

Parametrização do programa Magmasoft na Sakthi Portugal, SA

Rui Duarte Cruz de Barros

Orientador FEUP: Professor Doutor Carlos Alberto Silva Ribeiro

Orientadores Sakthi: Engenheiros Cristina Monteiro, José Rego e Daniel Silva

Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Porto, 3 de julho de 2015

CANDIDATO	<i>Rui Duarte Cruz de Barros</i>	CÓDIGO	<i>200907548</i>
TÍTULO	<i>Parametrização do Magmasoft na Sakthi Portugal, SA</i>		
DATA	<i>27 de julho de 2015</i>		
LOCAL	<i>Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala F103 - 10:00h</i>		
JÚRI	Presidente	<i>Professora Doutora Maria Ascensão Lopes</i>	<i>DEMM/FEUP</i>
	Arguente	<i>Professor Doutor Hélder Jesus Fernandes Puga</i>	<i>DEM/EEUM</i>
	Orientador	<i>Professor Doutor Carlos Alberto Silva Ribeiro</i>	<i>DEMM/FEUP</i>

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer ao Professor Carlos Silva Ribeiro por ter aceitado ser meu orientador, e por ter despendido o tempo e a atenção que não lhe eram exigidas.

De seguida, agradeço à Engenheira Cristina Monteiro e ao Engenheiro José Rego por me terem dado a oportunidade de desenvolver um trabalho aliciante, numa empresa de referência, numa área pela qual muito me apraz.

Endereço um voto especial de agradecimento ao Engenheiro Daniel Silva, cuja orientação e apoio foram indispensáveis para a realização do presente trabalho. Somente com o seu auxílio foi possível ultrapassar os desafios que foram surgindo.

Agradeço a toda a equipa da seção de Engenharia de Produto da Sakthi Portugal, especialmente aos Engenheiros Carlos Silva e Pedro Quelhas, por terem permitido a minha integração e enriquecido a minha experiência quer a nível pessoal, quer a nível profissional.

Ao Engenheiro Paulo Aguiar, pela colaboração prestada e pelo apoio prontamente servido, nos conhecimentos transmitidos, de forma incansável, e num tão curto espaço de tempo.

Aos meus amigos e colegas de curso que partilharam comigo estes anos de faculdade e que fizeram deste período uma jornada memorável da minha vida.

Ao Bernardo, Bruno e João, cuja longa e leal amizade esteve presente nos momentos mais difíceis.

À Beatriz, por nunca ter deixado de acreditar em mim. Para ela, não existem palavras que consigam demonstrar a minha gratidão, não só pela ajuda constante, mas também pela sua perseverança para comigo, ao longo destes anos.

Por último, mas de longe o não menos importante, o meu profundo agradecimento à minha família, aos meus pais e à minha irmã, que com o seu trabalho e sacrifício, me permitiram chegar aonde cheguei e tornar na pessoa que me orgulho de ser hoje.

Resumo

O objetivo deste trabalho assenta na necessidade da previsão adequada dos fenómenos de solidificação, por meio da utilização do programa *MagmaSoft*. Para que os resultados obtidos com a realização da simulação sejam relevantes, isto é, que correspondam ao que de facto se obtém no processo de fabrico da empresa Sakthi Portugal, é necessário que os parâmetros de processamento, fundamentais para a concretização da simulação, sejam alvo de estudo, por forma a identificar os “*inputs*” de maior relevo. Posto isto, concluiu-se que os parâmetros críticos a considerar são o fator de precipitação de grafite, a classificação do método de inoculação e o “*Treatment Yield*”, para além da consideração de machos nos parâmetros de malha e do posicionamento do cacho, relativamente ao bolo de areia. Por forma a comprovar o efeito que a variação destes parâmetros tem na sanidade de dois componentes de uma caixa diferencial, realizou-se um plano de simulações dinâmico, do qual se concluiu que com um fator de precipitação de grafite de 8, uma eficiência de inoculação de 140%, classificação de método de inoculação de “*Very Good*”, consideração do macho nos parâmetros de malha e posicionamento do topo da bacia de vazamento, coincidente com o topo do bolo de areia, se garantia, comparativamente com os parâmetros empregues pela empresa, garantir uma maior proximidade com a sanidade das peças fabricadas.

Palavras chave: “*inputs*” críticos, simulação, porosidade, ferro fundido nodular

Abstract

The main purpose of this writing lays on the need to predict the solidification phenomenon, using the casting simulation software *Magmasoft*. In order to achieve relevant results that correspond to what is really being produced in the factory of Sakthi Portugal, a study about the process parameters (accepted by the program) must be conducted.

Therefore, it's concluded that the critical inputs to be considered are "*Graphite Precipitation Factor*", classification of the "*Inoculation method*" and "*Treatment yield*", besides the consideration of the core on the mesh parameters and the position of the tree, regarding the top of the mold. To ensure the effect that the variation of these inputs have on the sanity of two components of a diff case, it was established a dynamical simulation plan, of which it's concluded that with a "*Graphite Precipitation Factor*" of 8, an "*Inoculation method*" of "*Very Good*", a "*Treatment yield*" of 140%, and with the consideration of core in the mesh parameters and making the top of the pouring pouring cup coincident with the top of the mold, it's guaranteed a closer results of porosity between the simulation and the reality.

Keywords: critical inputs, simulation, porosity, ductile iron.

Índice

Agradecimentos	iii
Lista de Figuras	xi
Lista de tabelas	xiii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento do projeto.....	1
1.2. Introdução à empresa	2
2. Revisão bibliográfica	3
2.1. Introdução ao ferro fundido.....	3
2.1.1. Ferro fundido cinzento nodular	4
2.2. Relevância da utilização de programas de simulação na indústria	5
2.2.1. MagmaSoft 5.2	6
2.3. Funcionalidades do programa - MagmaSoft5.2.....	6
I. Perspetiva de geometria.....	7
II. Perspetiva de malhamento	8
III. Perspetiva das definições de simulação.....	11
IV. Perspetiva da simulação	16
V. Perspetiva dos resultados	16
2.4. Consideração de “inputs” críticos	18
2.5. Funcionalidades do programa <i>Flow 3D</i>	20
I. Geometria.....	21
II. Malha	22
3. Caso de estudo	22
3.1. Histórico da peça	24
3.2. Diagnóstico e análise de defeitos	27
3.3. Planificação de simulações.....	29
3.3.1. Estratégia.....	29
3.3.2. Automatização de simulações.....	31
3.3.3. Definição de parâmetros de simulação	32
3.4. Apresentação e discussão de resultados	36
3.4.1. Referência 3391	37
3.4.2. Referência 3394	50

3.4.3.	Referência 3390	51
3.4.4.	Referência 3393	54
3.5.	Parametrização <i>Flow-3D</i>	54
3.5.1.	Simulação 1	55
3.5.2.	Simulação 2	55
3.5.3.	Simulação 3	56
3.6.	Apresentação e discussão de resultados	56
4.	Conclusão	58
5.	Sugestões para futuros trabalhos.....	59
6.	Referências bibliográficas.....	61
7.	Anexos	63

Lista de Figuras

Figura 1 - Interface de criação de projeto	6
Figura 2 - Interface da perspectiva da geometria	7
Figura 3 - Representação de resultado do malhamento	9
Figura 4 - Janela de definições de coeficiente de transferência de calor	12
Figura 5 - Janela de definições do processo	12
Figura 6 - Janela de inserção de valores de pressão	13
Figura 7 - Janela de inserção de parâmetros relativos ao “Melt Treatment”	14
Figura 8 - Representação de durezas de um componente	17
Figura 9 - Representação esquemática das referências 3389 (esquerda), 3390 (centro) e 3391 (direita) com os respectivos valores de massa.	23
Figura 10 - Representação esquemática das referências 3392 (esquerda), 3393 (centro) e 3394 (direita) com os respectivos valores de massa.	23
Figura 11 - Representação esquemática do componente <i>Housing</i> com vista de corte, e respectivas regiões da peça.	24
Figura 12 - Representação esquemática do componente <i>Cover</i> com vista de corte, e respectivas regiões da peça.	24
Figura 13 - Representação esquemática da sequência de etapas.....	24
Figura 14 - Representação da secção de corte com respectivo defeito e distâncias admissíveis.	25
Figura 15 - Representação esquemática da peça e do colo do alimentador, vistos de cima.....	26
Figura 16 - Exemplo ilustrativo do ficheiro executável com as respectivas funções e simulações.	31
Figura 17 - Perspetiva da <i>Simulação</i> do <i>MagmaSoft</i>	32
Figura 18 - Representação da curva de pressão inicial.	34
Figura 19 - Representação da curva de pressão final.	35
Figura 20 - Representação esquemática da atribuição do “ <i>ID Label</i> ”.	41
Figura 21 - Representação esquemática da seleção da opção “ <i>Generate Core</i> ”. ...	41
Figura 22 - Representação esquemática da gitagem com “ <i>air contact cells</i> ” na perspetiva de malhamento.	42

Figura 23 - Representação esquemática da gitagem com os respectivos respiros, na <i>Perspetiva da Geometria</i>	47
Figura 24 - Perspetiva da malha antes (à esquerda) e depois (à direita) da alteração do número de células.....	51
Figura 25 - Perspetiva da malha antes (à esquerda) e depois (à direita) da alteração da extensão dos canais.	52
Figura 26 - Perspetiva da malha antes (à esquerda) e depois (à direita) da alteração dos parâmetros de malha.	53

Lista de tabelas

Tabela 1 - Intervalos de teores de magnésio e correspondentes tipos de ferro fundido	12
Tabela 2 - Relação entre gama de valores de porosidade determinados pelo programa <i>MagmaSoft</i> e defeitos previstos.	36
Tabela 3 - Sequência de simulações.....	37
Tabela 4 - Sequência de simulações.....	37
Tabela 5 - Sequência de simulações.....	43
Tabela 6 - Sequência de simulações.....	50
Tabela 7 - Sequência de simulações.....	53
Tabela 8 - Sequência de simulações.....	54
Tabela 9 - Tempos de enchimento	56
Tabela 10 - Tempos de enchimento expressos em segundos.	57

1. Introdução

1.1. Enquadramento do projeto

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito da Dissertação de Mestrado de Engenharia Metalúrgica e Materiais, em parceria com a empresa de fundição *Sakthi Portugal, SA*.

O design de equipamentos de fundição, particularmente do sistema de gitagem e dos alimentadores, representa uma forte influência na qualidade e sanidade dos componentes resultantes do processo de fundição. A configuração do sistema de gitagem, cuja função é a de permitir a entrada de banho metálico para a cavidade moldante, baseia-se, em grande parte, em regras empíricas e na experiência adquirida. Atualmente, a configuração deste sistema é concebida tendo como base o método de tentativa e erro, sendo portanto o auxílio de programas de simulação uma ferramenta útil e fulcral nos dias de hoje. Com este método de abordagem, alcançar um sistema de gitagem que permita a obtenção de peças dentro da conformidade, pode-se revelar uma tarefa árdua e demorada [1].

Com a disponibilidade de programas de simulação numérica recentes, estes tornaram-se numa ferramenta importante para o “*design*”, análise e otimização dos processos de fundição. A simulação numérica dos processos de fundição fornece um meio eficaz e expedito de analisar vários fenómenos que ocorrem durante a solidificação do fundido. A mesma permite que o utilizador configure vários parâmetros, como coeficientes de transferência de calor, tempos de vazamento, fluxo de metal vazado, entre outros, assim como prever vários aspetos como porosidade, pontos quentes, módulos críticos e propriedades mecânicas. Se se alcançar a conjugação dos vários parâmetros utilizados no sistema, com o que se sucede na realidade durante o processo de fundição, então os dados resultantes da simulação, serão viáveis e ganharão outro relevo [1].

O interesse do presente trabalho, surge da necessidade da correta parametrização do *software* de simulação CAE, *MagmaSoft 5.2*, considerando os parâmetros críticos relacionados com a simulação de enchimento/solidificação de um sistema de gitagem e alimentação de um componente em ferro fundido nodular. O desafio do

trabalho foi alcançar uma maior aproximação entre os resultados obtidos nas simulações efetuadas com o programa de simulação *MagmaSoft* e os resultados obtidos nas peças reais, produzidas na *Sakthi Portugal, SA*.

Durante o desenvolvimento do trabalho, surgiu o interesse e a possibilidade de efetuar um estudo sob o comportamento de enchimento do mesmo sistema de gitagem, utilizando um diferente *software* de enchimento, o *Flow3D*, disponível no *Centro de Formação Profissional da Indústria de Fundição (CINFU)*. Desta forma, surgiu o objetivo paralelo de comparar os resultados de ambos, por forma a concluir qual deles permitia obter resultados, durante a fase de enchimento, mais próximos da realidade.

1.2. Introdução à empresa

A empresa Sakthi Portugal, é uma fundição de ferro fundido nodular, é uma divisão da Sakthi Sugars Ltd e faz parte da Sakthi Group, Coimbatore Índia. Este grupo está presente em diversos mercados como a indústria alimentar, produção de energia, logística, serviços de IT, entre outros [2,3].

A empresa situada na Maia, no distrito de Porto, encontra-se operacional desde 1972, tendo sido adquirida pelo grupo em 2007, originando a Sakthi Portugal. A empresa fabrica componentes críticos de segurança para a indústria automóvel como por exemplo travões, caixas diferenciais, braços de suspensão, garantindo o fornecimento das principais indústrias no ramo automóvel, como Mercedes, Volvo, PSA, AMG, Ford [2,3].

Com dois processos de moldação diferentes de fabrico o *GF* (“George Fisher”) e o *DISA* (envolvem planos de apartação horizontal e vertical respetivamente), a Sakthi Portugal possui três linhas de moldação *Disamatic* e uma linha de moldação *GF*, apresentando uma capacidade instalada de 90 mil toneladas/ano, que atende a 2,5 milhões de veículos ligeiros por ano [3].

Em particular, a processo de fabrico *DISA*, também denominado por *Disamatic* é uma linha de produção semi/automática usada para uma eficiente e rápida produção de moldes de areia para a indústria de fundição. Isto adequa este

processo ao fabrico de fundidos em massa para as indústrias automóvel e de máquinas, onde é usado comumente [4].

2. Revisão bibliográfica

2.1. Introdução ao ferro fundido

O ferro fundido, pese embora seja um material tradicional na fundição e, já muito se saiba a nível de processamento, o facto de se tratar de uma liga multifásica, faz com que tenha um enorme potencial no desenvolvimento e estudo da sua estrutura e, consequentes propriedades. As suas vantagens comparativamente a outras ligas, do ponto de vista de vazabilidade, custo, maquinabilidade e resistência ao desgaste, tornam-no num alvo de interesse [5].

Ao longo das 3 últimas décadas têm sido realizados estudos no sentido de se obter melhores propriedades, que permitam a utilização do ferro fundido em aplicações que anteriormente se julgavam impossíveis (por exemplo, na indústria da computação). Nesse mesmo sentido, o estudo dos processos de solidificação e mecanismos de controlo da morfologia da grafite, ganham enorme relevância para a melhoria contínua das suas propriedades [5].

Com particular aptidão ao processamento por fundição, proveniente de uma composição química característica próxima da eutética, o ferro fundido, consiste, genericamente, numa liga ferrosa com um teor de carbono superior a 2%. Apesar da composição química variável, para além do carbono, a adição de elementos de liga como silício e manganês é comum [6].

A reação eutética, responsável pelo tipo de ferro fundido, ocorre durante a solidificação de duas possíveis e distintas formas: a versão metastável, com o carbono combinado na forma de Fe_3C , da qual resulta uma fase denominada ledeburite característica dos ferros fundidos brancos que resultam desta versão; e a versão estável, onde o carbono se encontra livre, na forma de grafite, formando o ferro fundido cinzento. As diferentes formas adotadas pelo carbono que resultam em diferentes microestruturas e consequentemente em diferentes tipos de ferro, serão também responsáveis por diferentes propriedades apresentadas por cada tipo [6].

Apesar de não serem os únicos, os fatores predominantes na determinação de uma solidificação estável ou metaestável são a velocidade de arrefecimento imposta e a composição química do ferro. Desta forma, baixas taxas de arrefecimento, bem como maiores teores de carbono e silício levam à formação de um eutético grafítico, originando um ferro fundido cinzento, e vice-versa [6].

Devido à importância, a nível das propriedades finais, da estrutura da grafite presente nos ferros fundidos, a forma, o tamanho e a distribuição da mesma são normalizadas. As formas mais vulgares da grafite atribuem uma subclassificação aos ferros fundidos, originando as três principais versões comerciais: o ferro fundido lamelar, nodular e maleável [5,6].

A forma lamelar é associada aos ferros fundidos cinzentos com grafite lamelar, e a forma nodular caracteriza o ferro fundido cinzento nodular ou esferoidal, vulgarmente conhecidos apenas por “ferros cinzentos” e “ferros nodulares”, respetivamente [5,6].

Quanto ao ferro fundido maleável, este é uma exceção, uma vez que a determinação deste tipo não acontece pela versão de solidificação imposta, mas sim pela ação de um tratamento térmico de grafitização de um ferro fundido branco, apresentando uma grafite nodular irregular ou imperfeita [6].

2.1.1. Ferro fundido cinzento nodular

A precipitação da grafite sob a forma esferoidal é alcançada por meio da prática do tratamento de nodularização ao ferro fundido cinzento, formando assim o ferro fundido nodular [5,6].

Este ferro é a nível de características tecnológicas muito parecido ao ferro fundido cinzento. Contudo com propriedades mecânicas bastante superiores uma vez que, a presença de grafite sob a forma de nódulos em vez de lamelas, reduz o efeito concentrador de tensões, alcançando-se assim maiores resistências à deformação plástica aliada a uma razoável ductilidade [5,6].

Este ganho de propriedades confere um grande interesse aos ferros fundidos cinzentos, inclusivamente, a substituição em muitas aplicações de ferro cinzento e aço por esta nova família [5].

Os ferros nodulares solidificam a 1154 °C, pela reação eutética originando como produto uma mistura de austenite e grafite [6].

$$\text{Líquido (4,26\%C)} = \gamma(2,08\%C) + C_{\text{grafite}}(100\%C)$$

Com o intuito de controlar a formação de grafite e, considerando que não existe qualquer diferença no princípio físico envolvido na nucleação da mesma em forma de lamelas ou esferoides, o mecanismo de nucleação irá variar consoante a substância inoculante utilizada. Desta forma, para o ferro fundido nodular, é adicionado ao banho líquido, um pequeno, mas específico, teor de magnésio (inferior a 0,05%, normalmente, contendo também cério e terras raras) [2,3].

A adição fundamental deste elemento de liga tem como objetivo a reação do mesmo com o oxigénio e o enxofre, participando ativamente na forma como decorrerá a formação da grafite [5,6].

2.2. Relevância da utilização de programas de simulação na indústria

Durante os últimos 20 anos, o processo de simulação de fundição (por meio de programas CAE) tem vindo, gradualmente, a deixar de ser apenas utilizado na previsão de pontos quentes e determinação de módulos térmicos, para ser também empregue como uma ferramenta de avaliação, integrada na cadeia de produção das empresas de fundição. A otimização do formato do alimentador permanece como uma das tarefas mais árduas do processo de simulação. Dependendo do grau do ferro fundido a ser vazado, devem ser considerados diferentes comportamentos do alimentador por forma a se poder prever com maior exatidão potenciais defeitos na integridade da peça. Assim sendo, prever a formação de defeitos associados à contração da peça, por meio da determinação de pontos quentes não é suficiente, pelo que para se poder prever quantitativamente estes defeitos, será necessário no processo de simulação, conjugar determinados parâmetros por ordem a avaliar o impacto da morfologia de solidificação no comportamento do alimentador [7].

Para as empresas de fundição de ferro fundido, a utilização de processos de simulação tornou-se num importante instrumento para a previsão da eficácia e fiabilidade dos seus processos, especialmente a partir do momento em que se tem de considerar uma série de variáveis como a influência dos elementos liga,

processo de fusão, entre outros, para quantificar a contração e comportamento de solidificação do ferro fundido. A utilização de programas permite a previsão de estruturas, fases e, em último caso, de propriedades dos ferros fundidos [7].

2.2.1. MagmaSoft 5.2

O programa *MagmaSoft* 5.2 trata-se de um dos mais utilizados programas de simulação de enchimento/solidificação, na indústria da fundição, para a análise de defeitos e simulação de processos de fundição. Este *software* permite, utilizando o método de diferenças finitas, a previsão da qualidade do fundido, através da simulação de enchimento da cavidade moldante, de solidificação da liga e da formação da microestrutura [8].

2.3. Funcionalidades do programa - MagmaSoft5.2

O sistema de malhamento deste programa emprega o método de diferenças finitas, em que é subdividido o modelo 3D em vários cubos de número ou tamanho de aresta definidos pelo utilizador [8].

A interface inicial com o utilizador permite executar as seguintes operações:

- abrir projetos,
- criar projetos,
- criar versões (figura 1),
- aceder à base de dados dos coeficientes de transferência de calor.

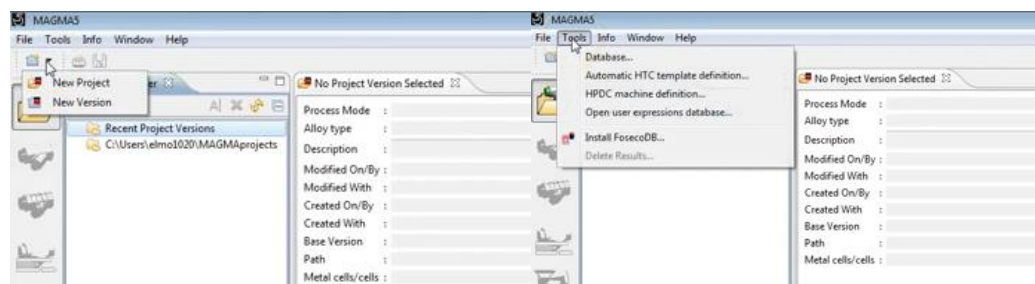


Figura 1 - Interface de criação de projeto [9].

Para se proceder à criação de um novo projeto, é necessário seleccionar o tipo de liga a simular, bem como o processo correspondente, tal como representado na figura 1a, presente em *Anexos* [9].

Posteriormente, é apresentada uma nova interface ao utilizador que contempla 5 menus com funções distintas entre si, comumente designados de perspetivas. Estas perspetivas, que vão ser pormenorizadamente descritas no decorrer deste capítulo, correspondem à:

- I. Perspetiva da geometria;
- II. Perspetiva do malhamento;
- III. Perspetiva das definições da simulação;
- IV. Perspetiva da simulação;
- V. Perspetiva dos resultados [9].

I. Perspetiva de geometria



Um requisito para o processo de simulação de enchimento e de solidificação passa pela apresentação da geometria do modelo como um modelo de volume 3D, ou seja, um sólido [9].

Para tal, a própria perspetiva da geometria permite ao utilizador, a criação de sólidos 3D, bem como a importação de desenhos 3D em formato STL e STP, modelados por outros *Softwares CAD* de sólidos ou de superfícies, como por exemplo o *SolidWorks* ou *PowerShape*, respetivamente [9].

A interface desta primeira perspetiva é apresentada de acordo com a figura 2.

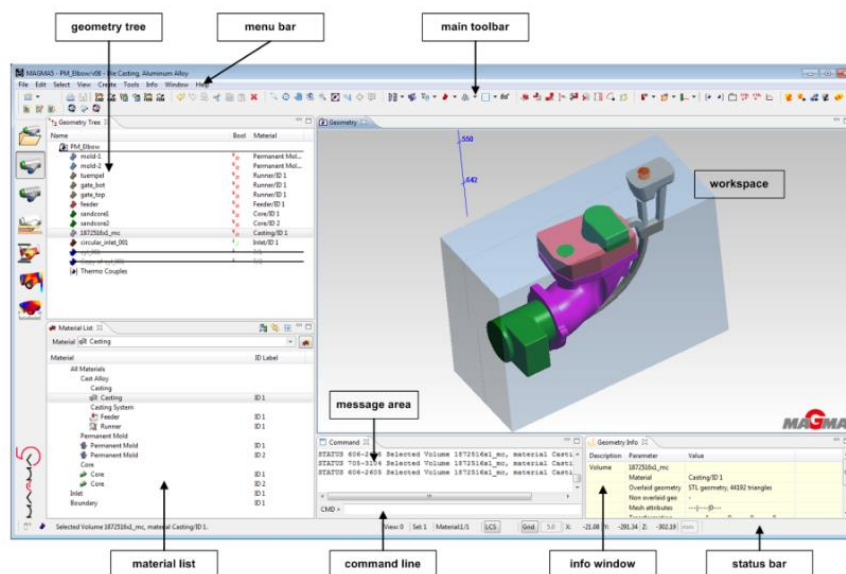


Figura 2 - Interface da perspetiva da geometria [9].

A zona gráfica de trabalho, constitui a zona principal uma vez que é esta região que permite a criação, transformação e visualização de todos os elementos geométricos, possibilitando até a recorrência de mais que uma vista, por meio de uma opção de vistas múltiplas [9].

Assinaladas na figura 2, encontram-se as principais zonas de trabalho. A topologia do modelo encontra-se apresentada na *geometry tree*, bem como as respetivas partes do mesmo [9].

Imediatamente abaixo, encontra-se a “*material list*”, onde é possível fazer identificações de materiais distintas, adequadas a cada componente do modelo. Por exemplo, se tiver sido realizado um “*Assembly*” de um modelo por meio do “*SolidWorks*”, e o mesmo tiver sido guardado em formato *STL*, aquando da importação do ficheiro *CAD*, o mesmo apresentará os diferentes componentes na perspetiva da geometria. Isso possibilita a que se atribuam diferentes materiais para cada componente, à semelhança do que se sucede noutros programas de simulação *CAE* (como o caso do “*SOLIDCast*”) em que se atribuem prioridades e materiais distintos para cada componente do modelo. Assim, no caso do fundido atribuir-se-á o “*ID Label*” de *casting*, e no caso de um alimentador, atribuir-se-á o “*ID Label*” de “*feeder*” [9,10].

II. Perspetiva de malhamento



O método de malhamento utilizado para estabelecer a divisão do modelo 3D em células unitárias, pode ser realizado de dois métodos: utilizando um valor fixo de número de elementos empregues na divisão do modelo ou através do estabelecimento de múltiplos parâmetros [9].

O estabelecimento do valor fixo de número de elementos é o método mais simples para estabelecer o malhamento, contudo, é o menos versátil. Nesse sentido, o programa admite, pelo segundo método acima mencionado, o uso de múltiplos parâmetros que permitem variar outros *inputs*. Neste método a inserção de dados consegue-se segundo três formas: clássico, *Minimum Wall Thickness* e equidistante. O método clássico engloba a utilização de vários parâmetros, como o “*Geometry Filter*”, “*Subdivisions*”, “*Minimal Element Size*”, “*Maximum Length Ratio of Neighboring Elements*” e “*Maximum aspect Ratio of an Element*” [9].

O “*Geometry Filter*” é utilizado para estabelecer os limites inferiores do modelo 3D que podem ser incluídos no malhamento [9].

A opção “*Subdivisions*” estabelece o número de subdivisões que cada célula possui, para cada direção, sendo que será também necessário fixar um valor para o tamanho mínimo de cada aresta da célula (“*Minimal Element Size*”) [9].

Relativamente ao parâmetro “*Maximum Aspect Ratio*”, este previne a formação de células de espessura demasiado reduzida estabelecendo um limite para o rácio entre a maior medida da célula e a menor medida [9].

O método “*Minimum Wall Thickness*” permite especificar o menor valor de espessura que a malha irá admitir [9].

Por último, o método equidistante permite estabelecer a medida de cada aresta da célula [9].

Com o malhamento definido, é possível, na opção “*Materials*”, identificar as células correspondentes a cada material, por associação de cores entre o modelo e a escala, tal como demonstrado na figura 2^a, presente em Anexos [9].

Para além disso, o programa contempla a opção “*mesh quality*”, que avalia a qualidade da malha criada e analisa as zonas da mesma que apresentam situações indesejadas. Detalhadamente, o programa dá uma indicação do número de células que correspondem a cada defeito da malha, apresentando-os diferenciados ao utilizador, também através da utilização de uma escala de cores, como apresentado na figura 3 [6].

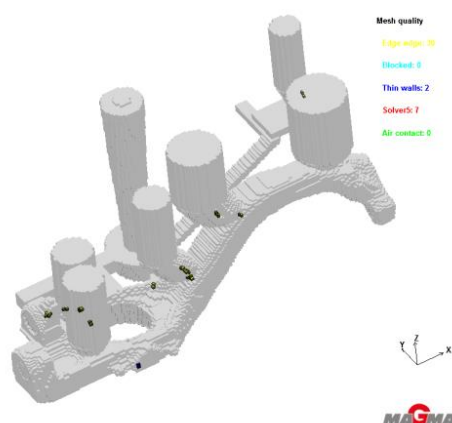


Figura 3 - Representação de resultado do malhamento [6].

Desta forma, reconhecendo as anomalias, estas são classificadas como:

- “*Edge-Edge*” (apresentadas a amarelo);
- “*Blocked cells*” (apresentadas a turquesa);
- “*Thin walls*” (apresentadas a azul escuro);
- “*Solver5*” (apresentadas a vermelho);
- “*Air contact*” (apresentadas a verde) [6].

As células associadas ao problema “*Edge-Edge*”, referem-se a um problema de continuidade. Indicam que o contacto entre células vizinhas é assegurado apenas pelas suas arestas. Esta situação é indesejada, na medida em que é necessário o contacto entre as superfícies das células para ocorra o fluxo de calor e de fluídos [6].

Ora, uma forma de solucionar este problema, será redesenhar a malha, alterando os parâmetros. Assim sendo, se for criada a malha pelo método do número de elementos, deverá ser aumentado o número de elementos, se for criada pelo método clássico, deverão ser diminuídos os valores do “*Geometry filter*” e do “*Minimal Wall Thickness*” e aumentados os valores “*Subdivisions*”. Caso a malha seja recriada pelo método equidistante, devem ser reduzidos os valores correspondentes às duas direções da ligação “*Edge-Edge*” [9].

As “*blocked cells*” são um indicativo de que existem células presentes na malha sem se encontrarem ligadas à zona de entrada de fluxo metálico, frequentemente conhecido como “*inlet*”. Se esta ligação não se verificar, não haverá forma da simulação considerar o fluxo de metal líquido por essas zonas, pelo que no final da simulação haverá a presença de porosidades nessas zonas. Esta situação verifica-se quando as células se encontram totalmente rodeadas por células que correspondem ao material de moldação, do macho, entre outros [9].

As zonas representadas como “*thin walls*” correspondem a regiões da peça cujas espessuras são constituídas apenas por uma célula unitária, o que pode tornar a simulação de enchimento pouco precisa [9].

Os elementos indicados como tendo o problema de “*air contact*”, são células que têm na sua vizinhança concavidades fechadas totalmente vazias. Isto sugere que no malhamento, existem regiões do seio da peça que não foram decompostas em

células unitárias, pelo que já se parte para a simulação com a certeza de que no final da mesma haverá regiões com porosidade garantida [9].

Posto que todos os problemas supramencionados são solucionados através do simples aumento do valor de número de elementos, presentes na malha, não será relevante abordar as outras formas de solução.

III. Perspetiva das definições de simulação



A simulação do processo de fundição requer tanto a definição de parâmetros relacionados com a geometria do modelo, como do processo em si. Nesse sentido, depois de criado o modelo 3D e o malhamento do mesmo, é necessário proceder-se à parametrização da simulação.

A versão do *Magmasoft* 5.2 permite a realização de simulação de enchimento/solidificação, considerando dois processos: o de moldação em areia e o de moldação permanente [9].

Posto que na empresa, o processo de fundição empregue é o de moldação em areia, o presente trabalho referir-se-á apenas e só à simulação desse processo.

Assim sendo, é nesta perspetiva que se estabelecem os “*inputs*” a considerar para a realização da simulação, bem como os “*outputs*” que se pretendem obter no final da mesma.

Ora, para a realização da simulação é necessário estabelecer os parâmetros dos materiais (liga vazada e areia), o coeficiente de transferência de calor, os “*inputs*” relacionados com o processo e os resultados que se pretende obter no final da simulação.

A sequência de seleção do material da liga vazada e da areia encontra-se representada na figura 3a (*Anexo A*), sendo que para exemplificação se considerou um ferro fundido nodular GJS 500 e areia em verde.

O cálculo do crescimento e solidificação das diferentes morfologias da grafite, efetuado pelo programa durante a solidificação, tem como base o teor de magnésio presente na composição química da liga. Isto permite analisar a microestrutura e a formação/morfologia da grafite, bem como estudar o comportamento dos alimentadores de um sistema de gitagem como função do tipo de grafite [9].

Assim sendo, o programa classifica o tipo de ferro fundido cinzento, mediante intervalos de percentagem de magnésio apresentados na tabela 1.

Tabela 1 - Intervalos de teores de magnésio e correspondentes tipos de ferro fundido [6].

GAMA DE VALORES (%)	TIPO DE FERRO FUNDIDO
0,0 a 0,005	Lamelar
0,005 a 0,03	Grafite compacta
>0,03	Nodular

Relativamente à seleção do coeficiente de transferência de calor, o programa tem predefinido um coeficiente para cada liga. Para a liga em questão, o sugerido pelo *software* é o *MAGMA/TempIron* (representado na figura 4). Este parâmetro, que influencia acentuadamente a evolução de solidificação da liga metálica, representa a forma como decorre o fluxo de calor através de uma interface [11].

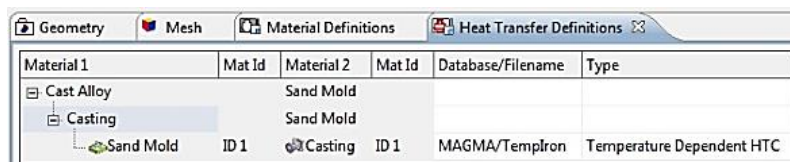


Figura 4 - Janela de definições de coeficiente de transferência de calor [9].

A interface relativa ao processo de fundição de moldação em areia pode ser visualizada na figura 5. Nesta área de trabalho é necessário selecionar os parâmetros relativos ao vazamento, ao tratamento do banho metálico (“*Melt Treatment*”) e à altura em que o processo finda [9].

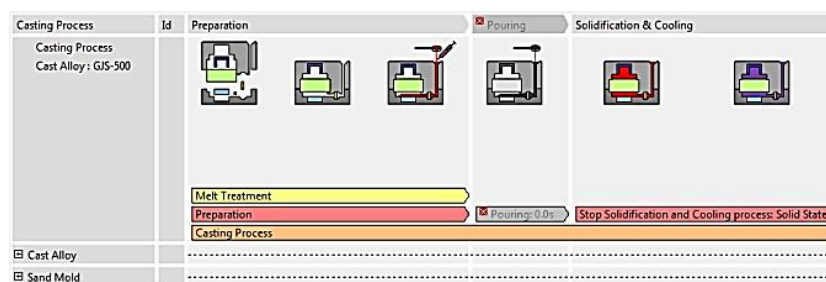


Figura 5 - Janela de definições do processo [9].

Como referido anteriormente, o programa permite não só simular a solidificação de ligas metálicas como o enchimento de uma cavidade de moldação. Este processo de enchimento pode influenciar fortemente os processos subsequentes de arrefecimento e de solidificação da liga vazada [9].

Para o processo de enchimento, é necessário regular determinados parâmetros relativos ao vazamento, tais como:

- Tempo de vazamento;
- Taxa de vazamento;
- Definição de uma curva de pressão [9].

Relativamente ao tempo de vazamento, o programa aceita esse parâmetro (em segundos) e converte-o num valor médio de taxa de vazamento, empregue durante toda a fase de enchimento da cavidade de moldação [9].

Com a opção da taxa de vazamento, é definido um valor de fluxo metálico dependente do tempo, que é apresentado pelo programa sob a forma de gráfico (figura 6). Este parâmetro define a quantidade de fluxo metálico que passa pela secção transversal do “inlet” e que entra na cavidade de moldação.

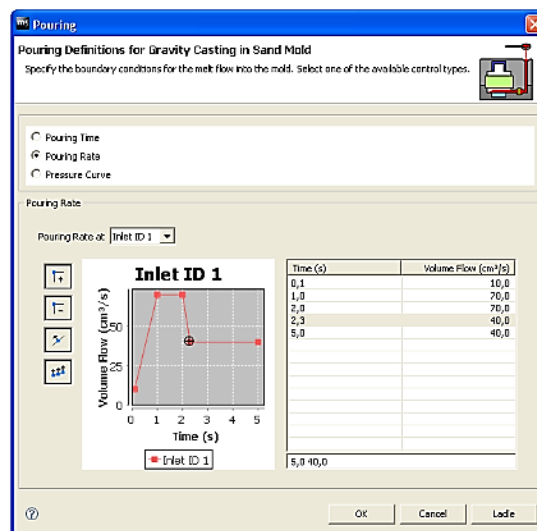


Figura 6 - Janela de inserção de valores de pressão [9].

Para a definição da curva de pressão, deve ser estabelecido o valor de pressão na superfície do “inlet” de forma a permitir que o programa determine a quantidade de volume vazado por unidade de tempo. A área de secção transversal do “inlet” permite que o programa calcule a velocidade de fluxo, mediante a pressão estabelecida, e assim saber a quantidade de metal vazado para dentro da cavidade de moldação. Este parâmetro é o mais indicado para sistemas em que se pretende determinar o tempo de enchimento da cavidade de moldação (encontra-se explicitado [9]).

Tratando-se a liga seleccionada de um ferro fundido nodular, é necessário especificar determinados parâmetros relativamente ao banho metálico. Assim

sendo, o programa compreende três “inputs” (figura 7): o método de inoculação, o rendimento do tratamento de inoculação e a precipitação de grafite [9].

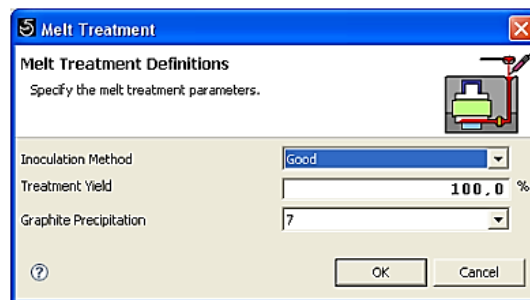


Figura 7 - Janela de inserção de parâmetros relativos ao “Melt Treatment” [9].

O parâmetro “*Inoculation Method*”, como o próprio nome indica, está associado ao método de inoculação, e pode ser classificado como “*Fair*”, “*Good*” e “*Very Good*” [9].

O valor estabelecido para o “*Treatment Yield*” varia entre 0 e 100% (poderá ser atribuído um valor superior a 100%, como será explicitado adiante no trabalho) e influencia diretamente o “*Inoculation Method*”, seja ele “*Fair*”, “*Good*” ou “*Very Good*” [9].

Como referido anteriormente, a grafite que precipita heterogeneamente requer um tratamento de inoculação. Assim, e porque a inoculação afeta grandemente o grau de nucleação da grafite, o *software* tem em consideração também este aspeto para o cálculo do número de nódulos formados durante a solidificação. A equação utilizada pelo programa para determinar este valor está apresentada na equação 1.

$$N_V = A \times \Delta T^B \quad (\text{equação 1})$$

O comportamento da nucleação, que corresponde ao número de núcleos ativos presentes a uma determinada temperatura, é descrito por uma lei de nucleação, que é controlada por uma constante de nucleação, que se apresenta na equação como “*B*”. O valor desta constante, é um valor padrão atribuído pelo programa, sendo que variará consoante o tipo de ferro fundido, que é classificado segundo o critério da tabela 1 (de acordo com o teor de magnésio) [9].

A variável “*A*” é determinada segundo a equação 2:

$$A = m \times y \quad (\text{equação 2})$$

em que “*m*” corresponde a um valor padrão (faz parte do “*know how*” da empresa criadora do *software*) que é atribuído quando o utilizador classifica o método de inoculação (o valor mais alto está associado ao método “*Very Good*”) e em que “*y*” corresponde a um valor de percentagem atribuído à eficiência de inoculação. Quando se especifica a eficiência de inoculação, altera-se o valor padrão atribuído pelo programa ao método de inoculação, pelo que este “*Input*” tem como função, ajustar o valor da constante “*A*” à situação fabril.

Por exemplo, se se especificar uma eficiência de 50%, e classificar o método de inoculação como “*Very Good*”, o programa irá reduzir o valor padrão atribuído a essa classificação para metade. Isso significa que em situação fabril, o método de inoculação terá uma eficiência inferior ao valor padrão atribuído pelo *Magmasoft*. Em situação contrária, se se especificar uma eficiência de 150%, o valor padrão atribuído pelo programa irá duplicar, o que significa que o método de inoculação, em situação fabril, terá uma eficiência superior ao valor estabelecido pelo *software* para aquele método de inoculação.

Assim, o valor da variável “*A*” poderá ser modificado, através da conjugação das classes de “*Fair*”, “*Good*”, “*Very Good*”, com os valores da eficiência de inoculação (“*Treatment Yield*”). Este ajustamento da variável “*A*” é necessário porque a utilização do mesmo método de inoculação em empresas de fundição distintas, poderá gerar resultados diferentes. Isto porque a contagem do número de nódulos será influenciada por outros fatores, como a utilização de diferentes substâncias e quantidades de inoculantes. Atualmente, existem indicações, dadas pela empresa criadora do programa, no sentido de, em fundições de pequenos componentes de automóveis, em que a inoculação é feita em “*Stream*”, se considerar valores de eficiência de inoculação superior a 100% [9].

Se forem utilizados para as constantes “*A*” e “*B*”, valores muito reduzidos, a solidificação poderá ocorrer mediante a forma metaestável, pelo que é originado um ferro fundido branco [9].

Relativamente ao parâmetro de precipitação de grafite, o programa compreende valores entre “1” e “10”, sendo que “10” considera o total potencial de expansão da grafite, pelo que durante a solidificação, a liga metálica terá uma baixa tendência a contrair. Ao invés, se considerado o valor de “1” considera-se que a

expansão de grafite ocorre com um grau muito reduzido, pelo que pouco irá compensar a contração do metal líquido durante a solidificação. Desta forma, é notório que a alteração deste parâmetro terá uma forte influência na formação de porosidades durante a solidificação do metal líquido [9].

Por último, relativamente aos parâmetros do processamento é necessário especificar a altura de término da simulação, pelo que se se pretender realizar uma simulação completa de enchimento e de solidificação, será necessário seleccionar o parâmetro de “*solid state*”, em que o programa admite que a simulação estará completa quando todos os componentes do modelo 3D estiverem no estado sólido (figura 4a, presente em *Anexos*) [9].

Antes de dar início à simulação, é necessário especificar quais os “*outputs*” que se pretendem obter com a realização da mesma.

IV. Perspetiva da simulação



É nesta perspetiva que se dá início à simulação, sendo que o programa permite parar e salvar a mesma. Um aspeto interessante do *software*, é o de permitir analisar os resultados já obtidos pela simulação, enquanto a mesma ainda se encontra a decorrer. Desta forma, o utilizador pode analisar os resultados obtidos na simulação de enchimento, utilizando a perspetiva dos resultados, enquanto ainda é executada a simulação de solidificação [9].

V. Perspetiva dos resultados



Neste menu, são apresentados os resultados dos parâmetros que haviam sido seleccionados na perspetiva das definições da simulação.

De facto, quando os parâmetros das perspetivas anteriores são seleccionados de forma adequada, as simulações de enchimento e de solidificação permitem a obtenção de resultados úteis, não só na hora de desenvolvimento do projeto, como no auxílio da cadeia de produção.

Assim, o programa permite a previsão de microestruturas, associando as quantidades de cada constituinte a cada região da peça. Depois de estabelecida essa associação, o *software* determina as propriedades mecânicas (resistência

mecânica, dureza, tensão de cedência, alongamento, módulo de Young) dessas regiões. Um exemplo ilustrativo pode ser observado na figura 8 [7,9].

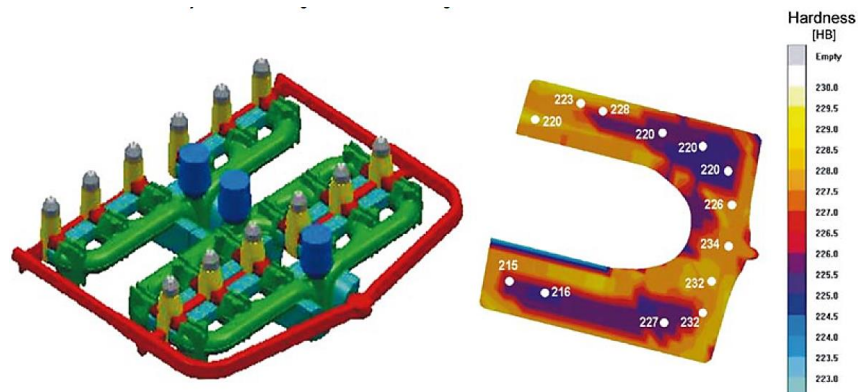


Figura 8 - Representação de durezas de um componente [7].

Os principais parâmetros de pós - processamento avaliados na simulação de solidificação são:

- porosidade;
- módulo térmico;
- pontos quentes;
- “*Critical Value for Solidifications/FsTime*” (tempo de coerência dendrítica) [9].

Com a utilização do critério da porosidade, como o próprio nome indica, é possível visualizar a presença de porosidades no modelo 3D. Por simples associação de cores entre cada região da peça e a escala disponibilizada pelo programa, é possível verificar a percentagem prevista de porosidade para cada uma dessas regiões. Se por ventura, a uma determinada zona da peça estiver associado o valor de 100% de porosidade, significa que existe a total ausência de material nessa região. A presença de porosidades nos fundidos deve-se ao aprisionamento de gases no banho metálico, contração do metal durante a sua solidificação, entre outros [9].

No entanto, por forma a avaliar a presença de defeitos volúmicos no fundido com rigor, devem ser consultados outros resultados. Um parâmetro considerado pelo programa, e que influencia diretamente a determinação de porosidades, é o “*Feeding Effectivity*”. Este parâmetro trata-se de uma propriedade do material, que corresponde à capacidade do mesmo ser alimentado, sendo que dependerá da morfologia de solidificação de cada liga. Posto isto, o programa considera um valor

predefinido para cada material da sua base de dados, pelo que não será um parâmetro que à partida o utilizador deve alterar [9].

O critério do módulo térmico ajuda a compreender quais as regiões da peça que solidificam por último, e a selecionar e dimensionar os alimentadores adequados para a peça em questão [12].

Relativamente ao critério dos pontos quentes, este demonstra as áreas da peça em que o tempo de solidificação difere das regiões vizinhas. Desta forma, auxilia a identificação de metal líquido residual, que se encontre rodeado por material a temperaturas inferiores. Sendo que estas zonas se encontram isoladas, e portanto inacessíveis ao caminho de alimentação, existe o sério risco de formação de rechupes [12].

O critério do “*Critical Value for Solidification* / “*FSTime*” permite exibir o tempo que cada região do modelo necessita para atingir a coerência dendrítica, ou seja o tempo até o qual a alimentação macroscópica é possível [9].

2.4. Consideração de “inputs” críticos

De acordo com o referido ao longo do trabalho, as potencialidades que a inserção de um *Software* de simulação de enchimento/solidificação, quer no desenvolvimento do projeto de fundição, quer na cadeia de processo do mesmo, são consideráveis não só no aspeto económico como na qualidade do fundido que se consegue atingir [7].

Ora, como se pode constatar pelo princípio de funcionamento do programa, a combinação dos mais diversos parâmetros permitem a obtenção e análise de variadíssimos resultados, como as propriedades mecânicas do fundido (dureza, resistência à tração, alongamento, entre outras), a microestrutura originada em diferentes regiões da peça (grafite, perlite, austenite, entre várias fases), sanidade da peça e analisar a ordem de enchimento e solidificação das várias peças presentes no cacho [7,9].

É neste contexto que surge o interesse da parametrização correta do programa utilizado na empresa, para que os resultados obtidos na simulação correspondam ao que se obtém de facto na realidade.

Caso contrário, todo o interesse da simulação desvanece-se, e os indicativos que a mesma fornece de nada servem para o utilizador.

Desta forma, são variadíssimos os “*inputs*” que o *Software* compreende e nem todos terão o mesmo grau de influência nos resultados obtidos, pelo que é necessário analisar o seu significado e verificar quais serão os parâmetros críticos a considerar de forma a adequá-los da melhor forma.

Ora, a contração e a formação de porosidades nos ferros fundidos (cinzento e nodular) depende principalmente de determinados fatores metalúrgicos e de processamento. Os fatores metalúrgicos englobam a matéria prima, a composição química da liga a fabricar e a eficácia do tratamento de inoculação. As condições de processamento referem-se à temperatura de vazamento do material, ao comportamento de enchimento da cavidade de moldação, ao *design* da placa molde, aos materiais utilizados na moldação, à dilatação das paredes de moldação, entre outros [13].

Assim, é notório que os parâmetros mencionados acima, devem ser especificados na simulação de acordo com o que se pratica de facto na situação fabril.

Tendo em conta, que na seção anterior (*Funcionalidades do programa*) se descreveram vários parâmetros relacionados com as diferentes perspetivas do programa, concluiu-se que dentro dos parâmetros relacionados com a geometria do modelo, malhamento, e processo de fabrico, os mais críticos para a boa adequação da simulação à realidade eram os relacionados com o processo. Isto porque quer na perspetiva da geometria, quer na perspetiva do malhamento, o próprio programa comunica ao utilizador a presença de inconformidades.

Posto isto, é necessário analisar quais os “*inputs*” críticos relacionados com o processamento.

Ora, a cinética de crescimento das fases formadas durante a solidificação, bem como as condições de arrefecimento determinam a morfologia da microestrutura formada. Nesse sentido, para o estudo da formação de porosidades e avaliação da sanidade da peça, através do uso do *software*, deverá ser estabelecida a parametrização correta da precipitação de grafite, do método de inoculação e “*Treatment Yield*”. Considera-se estes parâmetros como alvo de estudo, na medida

em que os restantes “*inputs*” presentes na “Perspetiva de definições da simulação”, como por exemplo o tempo de vazamento são de conhecimento empírico, e que portanto são considerados durante a fase de projeto [9].

2.5. Funcionalidades do programa *Flow 3D*

Nesta secção, irá ser explicitada de uma forma sintetizada o modo de operação do programa, de forma a posteriormente ser de fácil compreensão como se procedeu na realização das simulações da referência 3391.

A interface inicial apresentada ao utilizador, subdivide-se em quatro separadores principais:

- I. “*Simulation Manager*”;
- II. “*Model Setup*”;
- III. “*Analyze*”;
- IV. “*Display*” [11].

No primeiro separador (“*Simulation Manager*”), o utilizador tem acesso aos “*Workspaces*” e às simulações (figura 5a). É importante salientar que podem ser associadas diversas simulações ao mesmo “*Workspace*”, pelo que se poderá tratar de uma ferramenta útil quando se pretendem realizar várias simulações sob o mesmo modelo 3D, com parâmetros de simulações distintos [11].

Para além disso, neste separador é possível criar uma listagem das simulações a realizar sequencialmente, através do “*Queue Manager*” [11].

Relativamente ao separador “*Model Setup*”, o mesmo subdivide-se em seis separadores, que permitem efetuar operações distintas e estabelecer definições essenciais à realização da simulação [11].

Esses separadores são:

- “*General*”;
- “*Physics*”;
- “*Fluids*”;
- “*Meshing & Geometry*”;
- “*Output*”;
- “*Numerics*” [11].

No separador “*Physics*” o utilizador especifica os fenómenos físicos que o programa deverá admitir durante o desenrolar da simulação (como por exemplo coeficiente de transferência de calor, entre outros) e no separador relativo aos fluidos (“*Fluids*”) encontram-se estipuladas algumas características dos mesmos que podem ser alteradas, sem ser necessário para tal, criar um novo material de fluido (“*Fluid Material*”). Os dois separadores podem ser visualizados nas figuras 6a e 7a (Anexo A) respetivamente [11].

Relativamente ao separador do “*Meshing & Geometry*”, é nesta área de trabalho que o utilizador opera com a geometria 3D, sendo que para além do programa admitir a importação de modelos 3D, em formato *STL*, à semelhança de outros programas de simulação *CAE*, como o *MagmaSoft* e *SOLIDCast*, também permite a criação de sólidos [11].

A interface apresentada ao utilizador, que pode ser visualizada na figura 8a (Anexo A), permite realizar várias operações, sendo que no presente trabalho serão apenas abordadas as relacionadas com a geometria e com a malha.

I. Geometria



Este é o separador em que o utilizador pode realizar as operações relacionadas com os modelos geométricos. Para além de se poder modelar sólidos simples (esferas, cilindros, entre outros), é possível importar ficheiros em formato *STL*, criados por meio de um *software* de desenho (*SolidWorks*, *PowerShape*, entre outros), sendo que será necessário ter em atenção, em que unidade se encontra o modelo original, e em que unidades o programa *Flow3D* se encontra configurado. Por exemplo, caso o modelo original se encontre modelado em milímetros, e o *Flow3D* se encontre configurado em unidades *SI* (*Sistema Internacional*), será necessário especificar um valor de “*Global Magnification*” de 0,001, para alterar a unidade de referência. Aquando desta etapa de importação, para além de especificar a escala, é necessário particularizar a que tipo de componente corresponde cada modelo importado. A figura 9a ilustra a interface deste separador, bem como a janela que permite a alteração da escala [11].

É importante salientar, que o programa admite a atribuição da categoria de *Componente* e *Subcomponente* (“*Component*” e “*Subcomponent*” em

anglosaxónico) para cada modelo *STL*, que por sua vez possibilitam a atribuição de tipos de componentes distintos (“*Hole*”, “*Solid*”, entre outros). A atribuição do tipo de componente e da sua categoria, bem como operações de rotação e de posicionamento dos mesmos encontram-se apresentadas na “*Geometry Tree*”. Embora seja necessário diferenciar o que se pretende que seja oco e o que seja sólido, antes da etapa de atribuição de malha, é necessário atribuir o tipo de componente “*Solid*” a todos os componentes compreendidos na “*Geometry Tree*”. Ora, só depois de a malha ser gerada, é que se atribui os tipos de componentes desejados. No fundo, durante esta etapa, o utilizador define o que será considerado como cavidade moldante e gítagem [11].

II. Malha



Este é o separador em que se realizam todas as operações relacionadas com a atribuição de malha. Para originar a malha, é necessário realizar a operação “*add a mesh block*”, na qual será necessário atribuir o número de células unitárias, que a mesma deverá admitir para subdividir o modelo 3D, ou a medida da aresta de cada célula [11].

De seguida, será necessário descer a malha gerada para uma altura inferior à do topo da bacia, posto que o *software* considera a região exatamente acima do limite da malha, como a zona de entrada de metal líquido [11].

Depois de selecionados os parâmetros a admitir pelo programa, neste dois separadores, deverá apenas faltar ao utilizador, especificar quais os “*fluid*” e “*solid material*” e quais os parâmetros físicos a considerar, para dar início à simulação [11].

Assim que a simulação de enchimento esteja terminada, o operador poderá analisar uma série de “*outputs*” como a velocidade, pressão, aprisionamento de ar, entre outros, através [11].

3. Caso de estudo

O projeto, alvo de estudo durante o desenvolvimento do trabalho, assenta na conceção de caixas diferenciais, em ferro fundido nodular (GJS 500). As peças em

questão serão incorporadas em modelos de automóveis, prevendo-se um total de produção entre 2016 e 2022 de 1.325 toneladas.

Ora, o projeto contempla 6 referências internas que conjugam dois componentes distintos da caixa diferencial: os componentes *Housing* e *Cover* (figuras 9 e 10 respetivamente). As referências 3389, 3390 e 3391 são relativas a *Housings* com geometria idêntica, variando apenas na distância entre a região de maior diâmetro e o topo da peça; as referências 3392, 3393 e 3394 são alusivas às *Covers*, cuja única diferença entre si reside também nessa mesma medida.

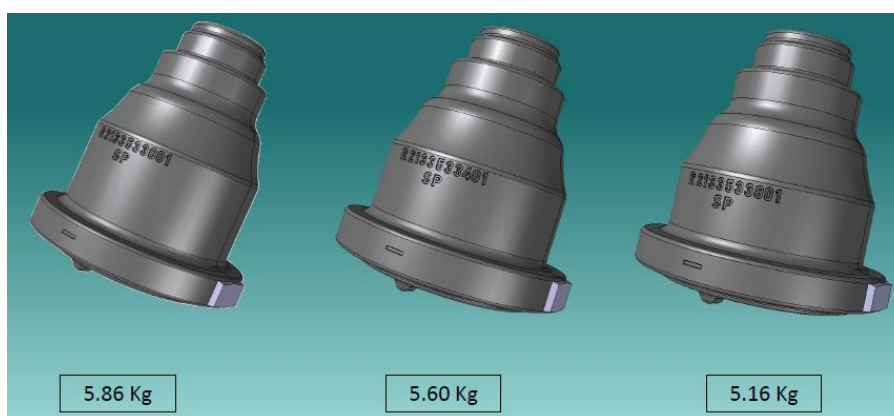


Figura 9 - Representação esquemática das referências 3389 (esquerda), 3390 (centro) e 3391 (direita) com os respetivos valores de massa.

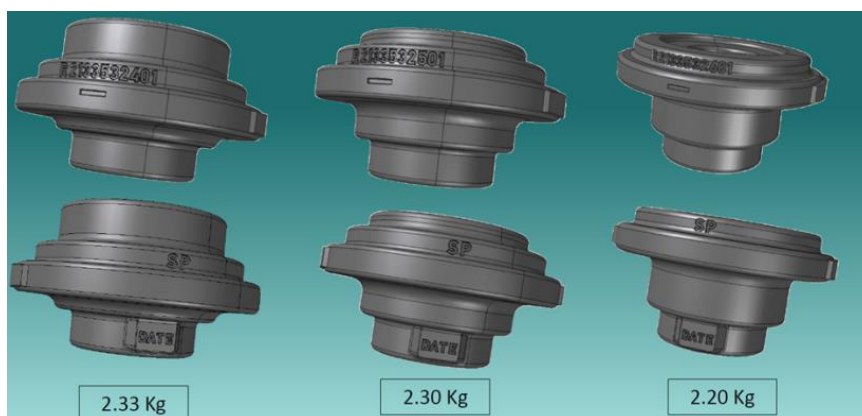


Figura 10 - Representação esquemática das referências 3392 (esquerda), 3393 (centro) e 3394 (direita) com os respetivos valores de massa.

Posto que a geometria interna das peças é igual (entre os componentes *Housings* e entre os componentes *Covers*), o macho utilizado é exatamente o mesmo.

Os sistemas de gitagem das quatro referências podem ser observados na secção A de anexos.

No presente trabalho, é relatado o estudo de parametrização apenas nas referências 3390, 3391, 3393 e 3394, uma vez que as 3389 e 3392 não tinham no momento qualquer volume de produção, o que não tornava possível realizar comparações entre os resultados obtidos nas simulações e na realidade. Ao longo do mesmo as diferentes regiões dos componentes *Housing* e *Cover* são nomeadas de acordo com as figuras 11 e 12, respectivamente.

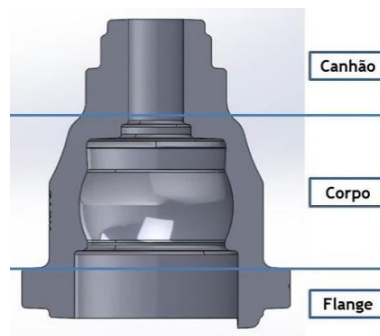


Figura 11 - Representação esquemática do componente *Housing* com vista de corte, e respectivas regiões da peça.

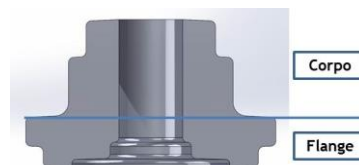


Figura 12 - Representação esquemática do componente *Cover* com vista de corte, e respectivas regiões da peça.

3.1. Histórico da peça

Em qualquer peça que seja produzida na empresa, durante a fase de desenvolvimento de produto, são realizadas as etapas descritas na figura 13.

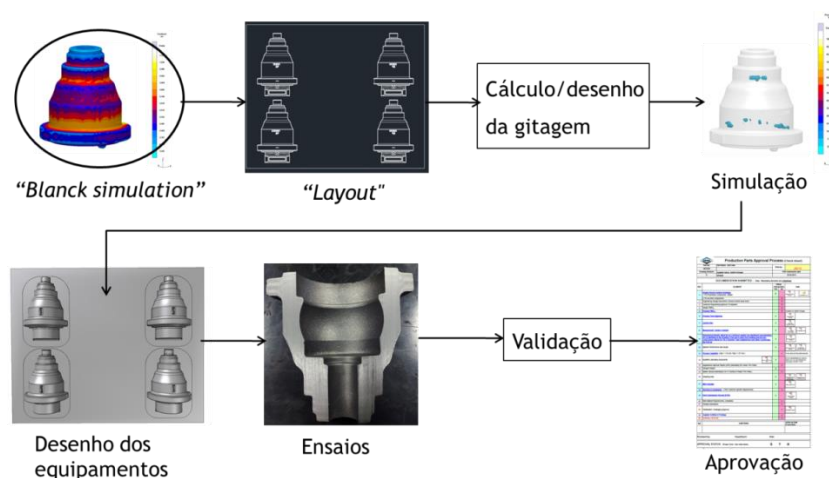


Figura 13 - Representação esquemática da sequência de etapas.

A etapa do cálculo do módulo crítico da peça e localização dos seus pontos quentes (realizada através da “*Blanck simulation*”, que consiste na simulação da peça dentro de um “bolo” de areia verde) é necessária para determinar que regiões da peça solidificam por último (identificando assim as zonas críticas da mesma) e para possibilitar o dimensionamento do alimentador a utilizar. Só dessa forma será possível proceder-se à etapa do cálculo/desenho do sistema de gitagem. No final, a conjugação destas etapas deverá permitir a correta conceção das peças.

Durante a fase de protótipos deste projeto, foi detetado nos componentes *Housings* um defeito não admissível, de acordo com as normas exigidas pelo cliente (porosidade nas superfícies maquinadas). A zona de ocorrência desse defeito situava-se na secção de junta em “L”, representada na figura 14. Uma vez que as peças são entregues, em bruto, para posterior maquinagem pelo cliente, foi necessário definir um critério interno para que, na presença de microporosidade, esta se encontrasse apenas em zonas permitidas pelo mesmo. Durante o processo de maquinagem é removido material interna e externamente (2,5 mm por banda), pelo que as peças que apresentassem microporosidade só seriam válidas, se a mesma se encontra-se a uma distância superior a 2,5 mm da superfície maquinada.

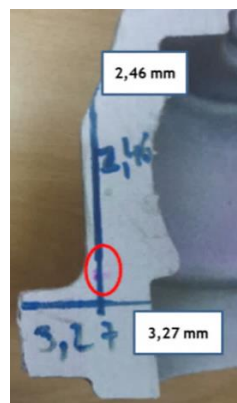


Figura 14 - Representação da secção de corte com respetivo defeito e distâncias admissíveis.

Embora, as geometrias das três *Housings* e das três *Covers*, como referido anteriormente, sejam muito semelhantes, o *design* dos sistemas de gitagem, bem como dos alimentadores utilizados são distintos. Pese embora, no desenvolvimento inicial se tenha partido de sistemas de gitagem iguais, devido a singularidades das peças (altura da peça, distância da flange ao canhão e o próprio peso da peça), as soluções finais de gitagem apresentaram algumas diferenças.

No caso das *Housings*, verificou-se durante o desenvolvimento de protótipos a ocorrência de duas inconformidades: valores de dureza fora da gama especificada pelo cliente e porosidade nas zonas críticas da peça.

Na figura 15, estão apresentadas as regiões 3 e 4 da peça, em que se registaram valores de dureza que se situam acima da gama de valores admissível pelo cliente (230 e 240, face a um objetivo de 170 a 210 HB) e as zonas 1 e 2 em que se registaram valores de dureza aceitáveis.

Para solucionar a primeira não conformidade referida, ajustou-se a cadência de produção da máquina de moldação, de forma a conferir um maior tempo de arrefecimento na linha produtiva.

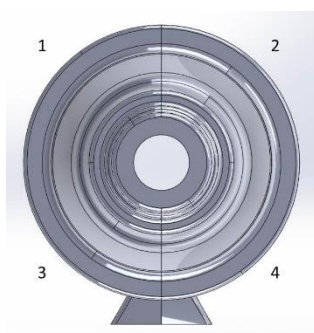


Figura 15 - Representação esquemática da peça e do colo do alimentador, vistos de cima.

Relativamente à questão da porosidade, como solução, procedeu-se à alteração do posicionamento dos alimentadores, ora afastando (no caso da referência 3390), ora aproximando (no caso da referência 3391). Esta solução, permitiu em ambos os casos, não só reduzir a gravidade da porosidade, como também reposicioná-la na zona especificada como admissível.

Atualmente, estão a ser realizados esforços no sentido de criar um sistema de gitagem em autorotura, para anular a limitação produtiva, permitindo a homogeneização dos valores de dureza das peças e solucionar os problemas de porosidade. Nesse sistema, é diminuída a área de secção de entrada do alimentador (também se altera a geometria do alimentador para compensar essa diminuição de área), de forma a que ocorra a separação entre as peças e os alimentadores, durante a fase de granalhagem.

Para a inspeção da sanidade das peças, foi estabelecido um critério de aprovação, em que se encontra estipulado que em regiões específicas das mesmas, não é

aceite a presença de qualquer porosidade e que noutras é aceite apenas a presença de microporosidade, de acordo com o catálogo de defeitos especificado pelo cliente. Como é prática comum, fez-se a associação dessa gravidade, indicada pelo cliente, segundo uma tabela de classificação interna da empresa. Dessa forma, foi possível classificar a gravidade indicada, como microporosidade detetável apenas por ensaio de Líquidos Penetrantes. Os diferentes tipos de gravidade estabelecidos e as respetivas dimensões (especificados no *software* de tratamento de dados da empresa “*Datapro*”), encontram-se apresentados na figura 1b, disponível em *Anexo B*.

Na figura 2b, presente em anexos, encontram-se representadas as diferentes secções da peça, com as respetivas gravidades admissíveis, sendo que as regiões a vermelho correspondem a gravidade “0” e as regiões a azul a gravidade “1”.

3.2. Diagnóstico e análise de defeitos

Por forma a estabelecer uma comparação, a nível de sanidade, entre as peças simuladas e as peças produzidas, foi necessário comprovar o grau de porosidade das mesmas, por meio de ensaios de Raio-X e de líquidos penetrantes. O objetivo era o de ter uma referência física que permitisse validar os parâmetros utilizados na simulação.

Para tal, foi realizada inspeção completa de Raio-X numa peça de cada cavidade, para todas as referências, sendo que de seguida se procedeu ao corte das mesmas ao longo do plano de apartação (zona identificada como crítica na fase de protótipos, que se veio a confirmar com a concretização das simulações), por forma a realizar o ensaio de líquidos penetrantes sob a mesma secção que havia sido analisada no ensaio de Raio-X.

As imagens referentes à inspeção de Raio-X e análise de líquidos penetrantes, de cada uma das referências, encontram-se em *Anexos D e E*, respetivamente. É de notar que em todas as referências analisadas por Raio-X, não se verificou a presença de descontinuidades/porosidade nas peças, pelo que se deduzia antes mesmo da análise de líquidos penetrantes, que ou não havia a presença de defeitos, ou a haver, seria apenas microporosidade, uma vez que a análise de Raio-X não permite a deteção de defeitos nesta ordem de grandeza.

Em todas as peças sujeitas a ensaio de Líquidos Penetrantes foi necessário garantir condições de superfície da peça e realizar o ensaio mediante o procedimento estabelecido pela empresa.

Relativamente à superfície, deve ser garantido que esta se encontra entre uma gama de temperaturas de 15° a 50°C, e que não haja a presença de aderências sólidas que alterem o desenrolar do processo capilar do líquido penetrante, podendo evitar que o mesmo penetre em porosidades abertas.

O procedimento de operação engloba quatro etapas distintas, tais como:

- aplicação do líquido penetrante;
- remoção do líquido penetrante;
- revelação;
- inspeção.

Durante a aplicação do líquido penetrante na superfície da amostra a analisar, deverá haver especial atenção relativamente à uniformidade e à espessura da camada de líquido que se encontra à superfície, de forma a evitar que, durante a penetração, o mesmo seque e interrompa o processo. O tempo de espera de ação do Líquido Penetrante encontra-se entre os 10 e os 30 minutos.

Depois do tempo de espera especificado, a superfície é limpa com um pano humedecido com removedor solvente, por forma a ser retirado o excesso de Líquidos Penetrantes (L.P.) da superfície da amostra. É necessária especial cautela relativamente à duração desta etapa, de modo a que o L.P. que esteja presente nalgum defeito da amostra (é o que se pretende, pois permitirá a revelação posterior dessa descontinuidade) não seja retirado. No final desta etapa, a superfície da amostra deverá ser observada, de forma a detetar a presença de algum corpo estranho, como por exemplo algum fio do pano de limpeza, que potencie uma inspeção incorreta. De seguida, procede-se à secagem da amostra (por meio de um aspersor de ar, entre outros), sem provocar o aquecimento da mesma (não excedendo os 50°C).

Só depois da devida conclusão da etapa anteriormente referida, é que se poderá proceder à revelação das descontinuidades, através uso de um revelador de pó seco, por *spray*. A inspeção deverá ser iniciada logo após a aplicação do revelador,

e findada assim que se ultrapassar um período de 10 minutos, posto que a partir desse momento o ensaio deixa de ser válido, pois a dimensão das descontinuidades poderá não corresponder à realidade.

3.3. Planificação de simulações

3.3.1. Estratégia

Para a realização de um estudo eficaz e expedito, que permitisse avaliar o peso relativo que cada variação de parâmetro representa nos resultados obtidos com a realização das simulações, foi necessário estabelecer um plano [15].

Inicialmente, considerou-se a utilização do método de *Taguchi* como ferramenta para a planificação das simulações, uma vez que, sendo um método baseado nos princípios do desenho estatístico de experiências fatoriais permitia estabelecer um quadro com um número reduzido de experiências [15].

Por exemplo, caso se pretenda estudar a influência de 7 parâmetros, tendo cada um deles dois níveis de valores, então, segundo o método do desenho fatorial completo, seriam necessárias 2^7 experiências. Mediante o método de *Taguchi*, perante a mesma situação, seria necessário realizar apenas 8 experiências, criteriosamente selecionadas, por forma a ser excluída informação redundante [15].

No caso do desenho estatístico de experiências (*DOE* - “*Design of experiments*”) é estabelecida uma variação conjunta entre os níveis de fatores de cada variável, e analisa-se o resultado. Este método é especialmente indicado quando se desconhece as relações entre as variáveis de entrada (“*Inputs*”) e as variáveis de saída (“*Outputs*”) [15].

A diferença entre a experiência fatorial completa e a experiência fatorial fracional reside no facto da primeira ser constituída sobre o total das combinações possíveis e a segunda ser constituída sobre um subespaço do caso anterior, estrategicamente definido.

Contudo, o método de *Taguchi* apresenta a limitação de ser apenas aplicável em experiências cujas variáveis sejam totalmente independentes, o que não é o caso

em questão, posto que, como referido anteriormente, os fatores de *Método de Inoculação* (“*Inoculation Method*”) e *Eficiência de Inoculação* (“*Treatment Yield*”) interagem entre si (visível na fórmula do número de nódulos) [16].

A grande desvantagem do método de *Taguchi* é a de os resultados obtidos não indicarem especificamente qual o parâmetro que tem maior preponderância nos resultados obtidos. Para além disso, o arranjo ortogonal, considerado no método de *Taguchi*, não testando todas as combinações de níveis de valores possíveis, não permite ao condutor da experiência garantir se ficou por analisar algum nível de valor que seja relevante. Além do mais, os métodos de *Taguchi* são inadequados para processos dinâmicos de alteração de variáveis como é o caso do estudo de simulações [16].

Como demonstrado anteriormente na secção de *Consideração dos inputs críticos*, comprovou-se que para a correta parametrização do programa ao processo de fabrico empregue pela empresa, seria necessário ter em conta os “*inputs*” críticos de precipitação de grafite, método de inoculação (“*Inoculation method*”) e eficiência de inoculação (“*Treatment yield*”). No entanto, depois de um estudo mais profundo sobre parâmetros que o programa admite, verificou-se que seria relevante considerar outros parâmetros (referidos adiante), o que potenciou um aumento do número de simulações a realizar.

Nesse mesmo sentido, foi necessário estabelecer um plano de simulações que permitisse, de forma gradual, eliminar níveis de valores de cada parâmetro a considerar. Isto só foi possível por que já havia sido realizado o estudo sobre a influência que determinados parâmetros tinham sobre a porosidade originada.

Por exemplo, considere-se que foram realizadas duas simulações exatamente com o mesmo modelo 3D, mesmos parâmetros de malha e mesmas definições da simulação, tendo ambas especificado um método de inoculação de “*Good*” e eficiência de inoculação de 100%. A única diferença entre ambas foi o fator de precipitação de grafite estipulado, sendo que numa foi admitido um fator de 5 e noutra de 6. Ora, no final da simulação verificou-se que comparativamente à porosidade presente nas peças fabricadas, ambas as simulações apresentavam volume e gravidade de porosidades superiores, sendo os resultados da simulação

com fator de 6 mais próximos da realidade. Dessa forma, não faria sentido prosseguir o estudo da influência dos seguintes parâmetros, considerando um fator de precipitação de grafite de 5.

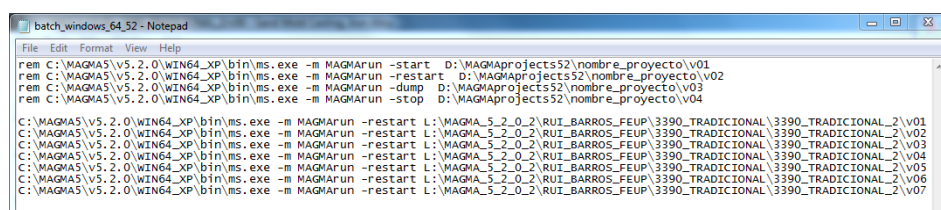
Posto isto, é notório que o *design* das experiências teria de ser dinâmico, isto é, a sequência de simulações teria de ser estabelecida ao longo do desenvolvimento do trabalho, à medida que se iam analisando os resultados obtidos.

3.3.2. Automatização de simulações

Pese embora o número de simulações necessárias, para o estudo dos parâmetros utilizados, tenha sido significativamente reduzido, utilizando o planeamento supramencionado, na medida em que permitia que de uma forma expedita se fossem eliminando possíveis simulações, a totalidade das mesmas permanecia bastante elevada, o que aliado ao facto de cada simulação ter um tempo associado extenso (de aproximadamente 16 horas de duração), tornava o processo de análise excessivamente demorado.

Nesse sentido, surgiu o interesse de utilizar uma ferramenta que permitisse a execução das simulações de forma automática, sem ser necessário o utilizador dar manualmente início a cada simulação. Dessa forma, seria possível, por exemplo, criar uma lista de simulações que seriam executadas de forma encadeada durante a noite.

Para tal, utilizou-se um ficheiro executável e editável, com a extensão “*.bat*”, cujo correto funcionamento depende da correspondência entre uma função, seja “*Start*” ou “*Restart*” e a pasta onde se encontra a simulação. Como exemplo demonstrativo, na figura 16, encontra-se a janela onde é possível editar o ficheiro, em que se observam as quatro primeiras linhas que não são executadas, e as restantes, que correspondem à execução de várias simulações, mediante a função “*Restart*”.



```
batch_windows_64_52 - Notepad
File Edit Format View Help
rem C:\MAGMA5\5.2.0\WIN64_XP\bin\ms.exe -m MAGMARun -start D:\MAGMAprojects52\nombre_proyecto\v01
rem C:\MAGMA5\5.2.0\WIN64_XP\bin\ms.exe -m MAGMARun -restart D:\MAGMAprojects52\nombre_proyecto\v02
rem C:\MAGMA5\5.2.0\WIN64_XP\bin\ms.exe -m MAGMARun -dump D:\MAGMAprojects52\nombre_proyecto\v03
rem C:\MAGMA5\5.2.0\WIN64_XP\bin\ms.exe -m MAGMARun -stop D:\MAGMAprojects52\nombre_proyecto\v04

C:\MAGMA5\5.2.0\WIN64_XP\bin\ms.exe -m MAGMARun -restart L:\MAGMA_5_2_0_2\RUI_BARROS_FEUP\3390_TRADICIONAL\3390_TRADICIONAL_2\v01
C:\MAGMA5\5.2.0\WIN64_XP\bin\ms.exe -m MAGMARun -restart L:\MAGMA_5_2_0_2\RUI_BARROS_FEUP\3390_TRADICIONAL\3390_TRADICIONAL_2\v02
C:\MAGMA5\5.2.0\WIN64_XP\bin\ms.exe -m MAGMARun -restart L:\MAGMA_5_2_0_2\RUI_BARROS_FEUP\3390_TRADICIONAL\3390_TRADICIONAL_2\v03
C:\MAGMA5\5.2.0\WIN64_XP\bin\ms.exe -m MAGMARun -restart L:\MAGMA_5_2_0_2\RUI_BARROS_FEUP\3390_TRADICIONAL\3390_TRADICIONAL_2\v04
C:\MAGMA5\5.2.0\WIN64_XP\bin\ms.exe -m MAGMARun -restart L:\MAGMA_5_2_0_2\RUI_BARROS_FEUP\3390_TRADICIONAL\3390_TRADICIONAL_2\v05
C:\MAGMA5\5.2.0\WIN64_XP\bin\ms.exe -m MAGMARun -restart L:\MAGMA_5_2_0_2\RUI_BARROS_FEUP\3390_TRADICIONAL\3390_TRADICIONAL_2\v06
C:\MAGMA5\5.2.0\WIN64_XP\bin\ms.exe -m MAGMARun -restart L:\MAGMA_5_2_0_2\RUI_BARROS_FEUP\3390_TRADICIONAL\3390_TRADICIONAL_2\v07
```

Figura 16 - Exemplo ilustrativo do ficheiro executável com as respetivas funções e simulações.

Para que as simulações fossem executadas corretamente, antes de se executar o ficheiro, foi necessário criar cada simulação normalmente, com os respetivos parâmetros, dar início à simulação de forma manual e realizar a operação “*Dump’n Stop*” de seguida (figura 17 ilustra a perspetiva de simulação do programa *MagmaSoft*).

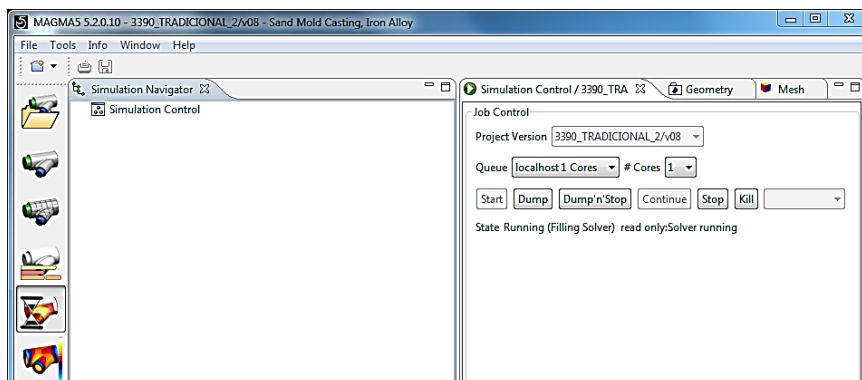


Figura 17 - Perspetiva da Simulação do *MagmaSoft*.

Esta foi a função utilizada para a execução das várias simulações durante o desenvolvimento do trabalho, visto que não se conseguiu implementar a função “*Start*” de forma eficaz.

É importante referir que para a execução correta do ficheiro foram necessários cuidados especiais, tais como:

- verificar se a parte da linha “C:\MAGMA5\v5.2.0\WIN64_XP\bin\ms.exe” coincidia de facto com a pasta onde estava instalado o *Magma5*;
- verificar se a última parte da linha “L:\MAGMA_5_2_0_2\RUI_BARROS_FEUP\3390_TRADICIONAL_2\v01” correspondia à pasta/versão da simulação que se pretendia calcular;
- não utilizar espaços em branco na linha correspondente à simulação;
- ter o programa *MagmaSoft* encerrado.

3.3.3. Definição de parâmetros de simulação

Dado que as referências, alvo de estudo ao longo do trabalho, se encontravam numa fase inicial de produção e com diversas ações de melhoria (devido às dificuldades anteriormente referidas), sem que estivesse determinado o tempo real/final de enchimento da cavidade de moldação de cada referência, utilizou-se

como método, para as definições da simulação/vazamento, o empregue pela empresa durante o desenvolvimento do produto.

O procedimento explicitado nesta secção, foi realizado de igual forma para todas as referências abordadas no desenvolvimento do trabalho, pelo que para efeitos de simplificação, se explicitará o cálculo efetuado apenas para o caso da referência 3391, dado que foi a primeira a ser alvo de estudo.

Inicialmente, antes da fase de produção, não se tem uma noção do tempo real de enchimento de uma cavidade de moldação.

De facto, durante esta fase, o que se tem é um tempo de enchimento estipulado, a partir do qual se calcula o sistema de gitagem.

Após o cálculo e modelação do sistema de gitagem já se encontrar realizado, será então necessário proceder-se à simulação. Tal só é possível, depois de serem estabelecidos todos os parâmetros do *software*, nos quais se encontram englobados os parâmetros de vazamento, que podem ser especificados de três formas distintas:

- tempo de enchimento (explicitado na secção de *Perspetiva das definições*);
- caudal (explicitado na secção de *Perspetiva das definições*);
- curva de pressão.

O método mais utilizado na fase inicial do projeto e que foi elaborado em parceria com a empresa que desenvolveu o *software*, é o da curva de pressão, na medida em que permite que o utilizador possa atribuir diferentes valores de pressão para tempos distintos de enchimento. Para tal, é necessário realizar cálculos matemáticos, por forma a que os valores de pressão especificados sejam adequados.

Assim, numa fase inicial é necessário estimar qual o peso do cacho, para se determinar o caudal necessário para encher o molde no tempo estabelecido. Posto isto, por meio do *Software* de desenho CAD 3D, *SolidWorks*, que nos permite visualizar o peso de cada componente modelado, foi possível determinar que o peso do cacho seria de 38, 555 kg. Ora tendo como tempo de enchimento objetivo, 9 segundos, determinou-se o caudal correspondente da seguinte forma:

$$Caudal = \frac{massa}{tempo} = \frac{38,555}{9} = 4,28 \text{ Kg/s.} \quad (\text{equação 3})$$

Tendo em conta que em situação fabril, a quantidade de metal líquido vazado para dentro da cavidade de moldação, numa fase inicial é significativamente superior, posto que entre a saída da bica e o topo da bacia não existe nenhum canal a controlar o fluxo de metal, então, considera-se que o caudal determinado, corresponde ao dobro, ou seja, equivale a 8,56 kg/s (de acordo com o manual do *software*). Depois de se ter alcançado esse valor, obteve-se um valor correspondente de pressão de 85 mbar, por meio de uma tabela utilizada na empresa (tabela 1b), em que se encontram tabelados os valores correspondentes entre pressão e caudal, para um “inlet” com 32 mm de diâmetro. Para todas as simulações realizadas ao longo do trabalho, foi considerado este valor para o diâmetro do “inlet”, visto que no processo de fabrico, o diâmetro da bica das banheiras de vazamento tem esse valor.

Em grosso modo, o procedimento assenta em realizar uma primeira simulação, tendo como curva de pressão uma que admita um valor de pressão constante, que corresponde ao caudal determinado (figura 18).

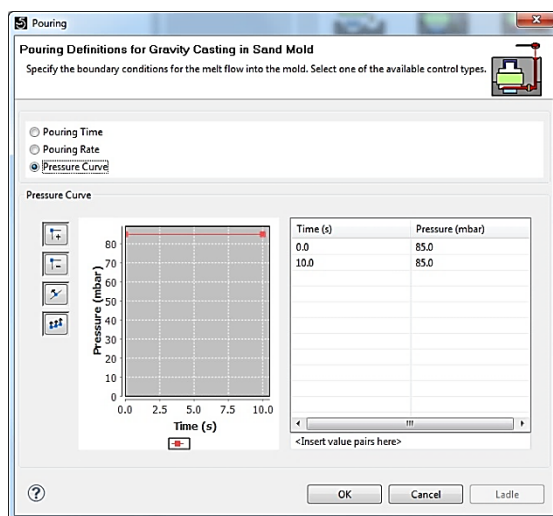


Figura 18 - Representação da curva de pressão inicial.

Ao realizar essa simulação, o programa determina uma curva de fluxo, em que se pode observar que num estágio inicial o fluxo de metal é elevado e constante, até chegar a um ponto em que ocorre uma quebra. Essa quebra ocorre, a partir do momento em que a bacia de vazamento se encontra totalmente cheia, e o caudal volta a ser constante, mas com um valor inferior.

A informação que se pretende retirar desta curva, é qual o valor de fluxo de metal depois da bacia se encontrar cheia, ou seja, depois de ocorrer a quebra de caudal, e qual o valor de tempo correspondente. Assim, a partir do momento em que se obtêm esses valores, a simulação deixa de ser relevante e poderá, portanto, ser descartada.

A curva de vazamento a partir da qual se retiraram os valores, encontra-se apresentada na figura 8b, presente em *Anexo B*.

Depois de alcançado o valor de caudal constante (718 cm³/s), associou-se, novamente por meio da tabela supramencionada, o valor de pressão correspondente, pelo que se concluiu tratar de um valor de 30 mbar. De seguida, foi necessário estipular a que valor de tempo correspondia cada valor de pressão, por forma a se estabelecer a curva de pressão. Ora, o procedimento implementado pela empresa dita que o segundo e terceiro valor de tempo deverão ser calculados da seguinte forma:

$$T1 = T - 0,01;$$

$$T2 = T + 0,01;$$

assumindo-se como valor da incógnita “*T*”, o valor de tempo correspondente ao caudal de 718 cm³/s, que é neste caso de 0,0767 s.

Desta forma, foi possível realizar as simulações seguintes, que representaram o foco de estudo durante o trabalho, considerando uma curva de pressão com os valores admitidos (apresentados na figura 19).

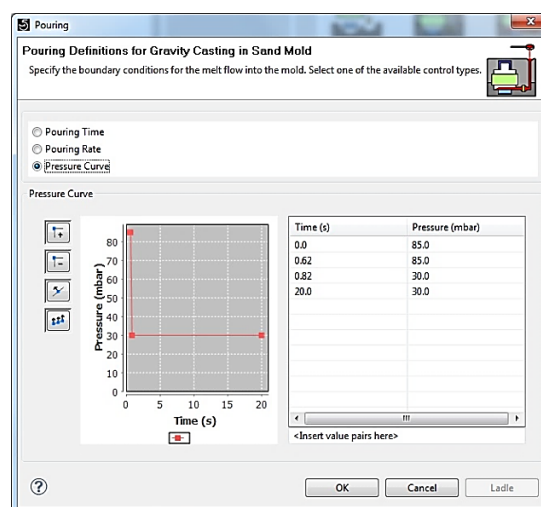


Figura 19 - Representação da curva de pressão final.

As curvas de pressão final para as restantes referências, que foram alcançadas mediante o mesmo procedimento, encontram-se em *Anexos B*.

3.4. Apresentação e discussão de resultados

Nesta seção do presente trabalho, são apresentados e discutidos os resultados obtidos com a realização das várias simulações (fazendo-se sempre uma correspondência com as peças fundidas), para cada uma das referências. O “*Output*” analisado foi a porosidade (apresentado sob a forma de percentagem) sendo que para tal, foi necessário utilizar as ferramentas “*x-ray*”, para se poder observar o interior das peças, e “*clipping*” para se poder cortar as mesmas, segundo o plano desejado. É importante salientar, que o plano de corte analisado foi o xz, embora não tenha sido o mesmo para todas as peças, posto que, como irá ser demonstrado de seguida, o posicionamento das porosidades diferia de peça para peça.

Um aspeto essencial para o desenvolvimento do trabalho, foi o de considerar uma gama de valores estabelecida pela empresa, em que se fazia corresponder o que se alcançava a nível de sanidade das peças produzidas, e o indicado pelo *software* de simulação *Magmasoft*. A tabela 2 demonstra a relação entre as gamas de valores e os defeitos previstos.

Tabela 2 - Relação entre gama de valores de porosidade determinados pelo programa *Magmasoft* e defeitos previstos.

GAMA DE VALORES (%)	DEFEITO PREVISTO
0,0 a 10,0	Sem defeito/microporosidade ¹
10,1 a 15	Microporosidade ²
>15	Macroporosidade

¹ Microporosidade detetada apenas por ensaio de líquidos Penetrantes; ² Microporosidade detetada por Raio-X.

Assim, mediante os valores de percentagem de porosidade indicados em cada simulação, e comparando com os intervalos estipulados, foi possível comprovar se os valores eram coerentes com os resultados obtidos por meio dos ensaios de Raio-X e Líquidos Penetrantes (realizados mediante o explicitado na secção de *Diagnóstico e análise de resultados*).

O estudo de cada referência foi naturalmente condicionado pela data de produção, estipulada pela empresa, pelo que inicialmente, se realizou um plano de simulações para a referência 3391, e de seguida, para as 3394, 3390 e 3393.

3.4.1. Referência 3391

Inicialmente, foram realizadas quatro simulações com valores de fator de precipitação de grafite distintos (tabela 3), para a mesma eficiência e classificação do método de inoculação.

Tabela 3 - Sequência de simulações.

Simulação	M. Inoculação	Prec. Grafite	" <i>Treat. Yield</i> " (%)
1	" <i>Very Good</i> "	7	100
2	" <i>Very Good</i> "	8	100
3	" <i>Very Good</i> "	9	100
4	" <i>Very Good</i> "	10	100

O objectivo era o de verificar qual o fator de precipitação de grafite que permitia uma maior aproximação de resultados, a nível de gravidade de porosidade, com o que se obtinha na cadeia de produção. Ora, por simples observação na "*Perspetiva de Resultados*", foi possível constatar que os resultados reais das peças, se situavam entre as simulações 2 e 3 (figuras 2c e 3c respetivamente), correspondentes a fatores de precipitação de grafite 8 e 9, isto comparando com as porosidades observadas nas peças, aquando do ensaio de Líquidos Penetrantes.

De seguida, por forma a estudar a influência de outros fatores para além dos "*inputs*" críticos referidos anteriormente, foram realizadas as simulações (apresentadas na tabela 4), com a particularidade de se ter fixado o fator de precipitação de grafite com o valor de 7, o método de inoculação de "*Very Good*" e a eficiência de inoculação de 100% (parâmetros praticados pela empresa).

Tabela 4 - Sequência de simulações.

Simulação	M. Inoculação	Prec. Grafite	" <i>Treat. Yield</i> " (%)	Observações
5	" <i>Very Good</i> "	7	100	Permeabilidade
6	" <i>Very Good</i> "	7	100	C.Q. ¹ Média (DataPro)
7	" <i>Very Good</i> "	7	100	C.Q. ¹ Específica (Data Pro)
8	" <i>Very Good</i> "	7	100	"Weak sand mold"
9	" <i>Very Good</i> "	7	100	Com macho
10	" <i>Very Good</i> "	7	100	Topo da bacia

¹ C.Q. – Composição Química

É importante referir que se procedeu à comparação de resultados entre as simulações acima apresentadas, e a simulação número 1, que contempla as condições *standard* empregues pela empresa.

Desta forma, comparando a simulação 5, em que foi selecionada a opção de consideração da permeabilidade da areia, disponível na perspetiva de “*Definições da simulação*”, com a simulação 1, é possível comprovar que a nível de porosidade, se denota um aumento significativo, quando considerada esta opção (figuras 5c). Para além disso, verifica-se uma maior disparidade de resultados entre peças do mesmo nível, sendo que por exemplo a peça da posição 1, apresenta na região do canhão uma zona com $\approx 11\%$ de porosidade, enquanto a peça da posição 3 apresenta, numa região aproximadamente simétrica, um valor de 21%. A utilização deste parâmetro foi considerada, na medida em que nas simulações anteriores ocorria a formação de porosidades nas proximidades do topo da peça (região do canhão). Em situação prática, esse tipo de defeitos está geralmente associado ao bloqueamento do escape de gases, durante a fase de enchimento, originando o defeito denominado de “bolhas de gás”. Para além disso, previa-se que a sua consideração teria influência na taxa de arrefecimento das cavidades moldantes, pelo que seria interessante estudar que alterações provocava ao nível da sanidade das peças.

Relativamente à simulação 6, o parâmetro que se alterou foi o da composição química da liga e da areia utilizada. Para tal, foi necessária a utilização do *software* interno da empresa, *Datapro*, que permite acompanhar cada etapa do processo para cada referência, fornecendo diversas informações, tais como a composição química da liga (entre outras), que é determinada em intervalos de tempo específicos. Nesta situação, procedeu-se ao cálculo da composição química média a partir dos valores registados e apresentados no *software* (figuras 13b e 14b, presentes em *Anexos B*). No final, inseriram-se apenas os teores dos elementos apresentados na figura 15b (*Anexo B*), na medida em que o programa não admite todos os elementos estipulados no *Datapro*.

De uma forma geral, a alteração da composição química padrão de um GJS-500, admitida pelo programa, para a composição química supramencionada, potenciou um aumento da severidade dos rechupes, como se pode comprovar por simples

comparação entre as peças das mesmas posições do cacho. Os resultados obtidos na simulação 6 encontram-se apresentados na figura 6c.

Contudo, analisando os resultados obtidos, é notória uma diferença acentuada a nível de porosidade entre peças de posições simétricas. Por exemplo, enquanto a peça 1 apresenta um valor de porosidade na ordem dos 13%, a peça 3 apresenta aproximadamente 40%, o que para além de se tratar de um valor bastante distante da realidade (na medida em que se encontra na gama da macroporosidade, de acordo com o explicitado anteriormente) demonstra uma disparidade de resultados significativa, pelo que nalguns casos se nota uma aproximação de resultados entre as simulações em estudo (1 e 6) e noutros casos um afastamento. Ora tendo em conta esta diferença de resultados, que poderá ser explicada pelo facto de o programa admitir apenas a especificação de determinados elementos (como referido anteriormente), conclui-se que este parâmetro não devia ser considerado para simulações posteriores.

No caso da simulação 7, o parâmetro que se alterou foi também relativamente às composições químicas da liga e da areia, sendo contudo, que nesta situação a composição química utilizada foi de um registo específico do *Datapro* (destacado nas figuras 13b e 14b), contrariamente ao caso anterior em que se determinou uma média de todos os registos. Este parâmetro foi considerado, pois pretendia-se estudar se havia alterações significativas na sanidade das peças, quer comparativamente à simulação padrão realizada pela empresa, quer à simulação número 6. Desta forma, se os resultados se verificassem viáveis, poderia ser uma ferramenta útil para analisar um cacho específico (com composição química específica), obtido na produção, pelo que potenciaria a utilização do *software* não apenas como ferramenta de auxílio numa fase inicial do projeto.

No entanto, de acordo com o observado na figura 7c, verificou-se novamente uma discrepância de valores para peças de posições simétricas (peça 1 registou valores de porosidade 14%, enquanto a peça 3 registou valores de 23%). Para além disso, ocorre um aumento de porosidade em relação à simulação 1, pelo que a incorporação desta composição química na simulação, potenciaria o distanciamento entre os resultados obtidos na simulação e na realidade.

Também se considerou alvo de estudo, a consideração da classificação de “*Weak sand mold*” para a dilatação do molde. Isto porque, segundo o “*Help Task*” do programa, era aconselhada a sua utilização para simulações em que se utilizasse areia verde, como aliás se sucede no nosso caso.

Contudo, analisando os resultados relativos à simulação 8, apresentados na figura 23c, pôde-se comprovar que com a utilização deste parâmetro, eram originadas porosidades numa região situada no topo dos canhões das peças inferiores do cacho (peças 2 e 4).

Ora, posto que esse defeito não foi detetado nas peças reais, concluiu-se que para o nosso caso em questão, a nível de dilatação da moldação será sensato utilizar o modo “*Stable mold*”, até porque embora no sistema *DISA* seja utilizada a areia verde, a taxa de compactação da areia é elevada, pelo que não se presenciará grande dilatação da moldação durante o vazamento.

Outro parâmetro estudado, com a realização da simulação 9, foi o da utilização de macho. O mesmo foi modelado através do *software SolidWorks*, como havia sido realizado aquando da modelação da giteagem, sendo que de seguida se procedeu ao “*Assembly*” de todos os componentes.

Um aspeto importante a ter em conta, durante a definição dos parâmetros da simulação (na perspetiva das *Definições da Simulação*) foi o material associado ao macho, que neste caso se tratava de um material admitido pelo próprio programa, de designação “*Furan-Core*”, cuja composição se assemelha ao material empregue no processo de fabrico dos machos (areia de sílica com Dimetiletilamina). Para além disso, também foi necessário, na *Perspetiva da Geometria* estabelecer um “*ID Label*”, para o macho, de “*Core*” (figura 20) e, na *Perspetiva da Malha* seleccionar a opção “*Generate core*” (figura 21).

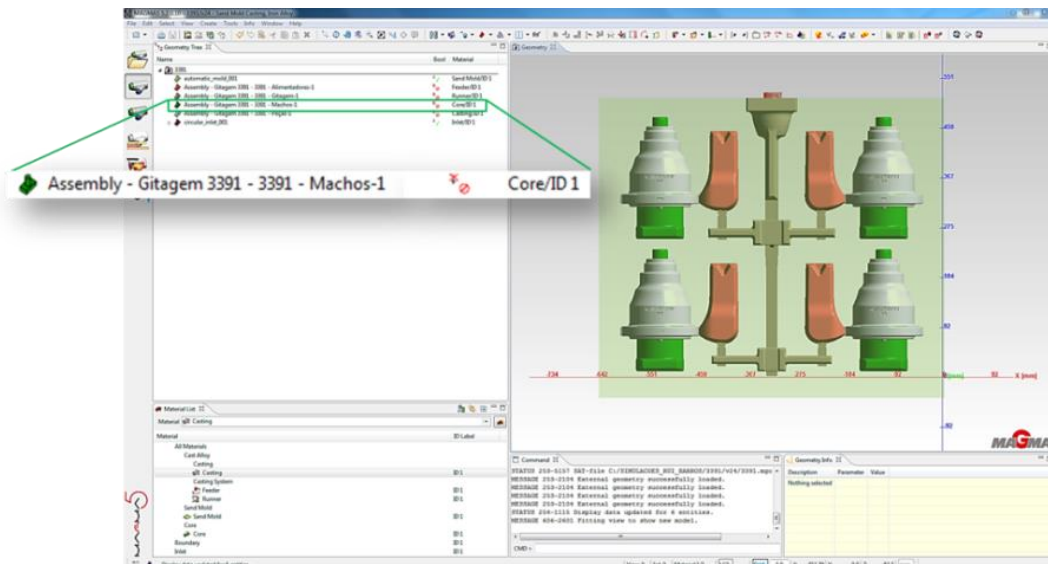


Figura 20 - Representação esquemática da atribuição do “ID Label”.

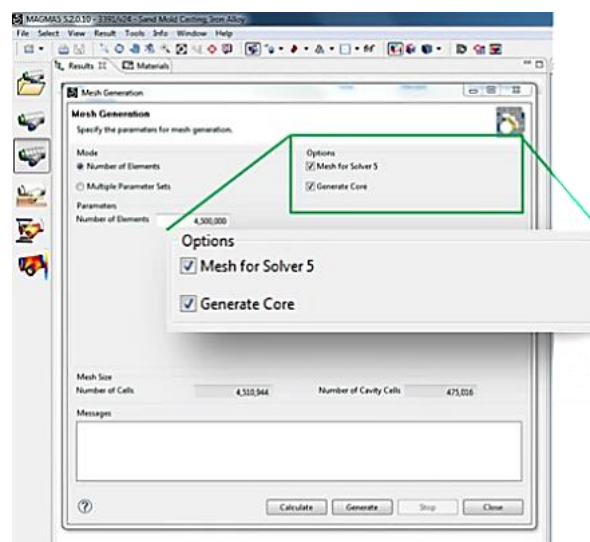


Figura 21 - Representação esquemática da seleção da opção “Generate Core”.

Ora, depois de finalizada a simulação e analisando os resultados, tendo sempre como referência os resultados obtidos na simulação *standard* (simulação número 1), foi possível comprovar que com a utilização de machos, de uma forma geral se potenciava o aumento da probabilidade de rechupes. É possível verificar que na peça 3, mediante a figura 9c, se atinge junto da zona da flange, uma percentagem de porosidade de aproximadamente 43%, pelo que se encontra já na gama da macroporosidade.

Para além disso, confirma-se que se mantém uma diferença de porosidade significativa entre a peça 3 e as restantes.

Outro aspeto que se considerou interessante estudar, foi a posição do cacho em relação ao “bolo de areia”. Como referido anteriormente, durante a etapa de malhamento, o programa dá indicação da presença de erros na malha gerada, como por exemplo, “Edge-Edge”, “air-contact”, entre outros. Posto isto, é prática comum da empresa, aquando do posicionamento do cacho, situá-lo numa altura inferior ao topo do moldação, de forma a evitar que o topo da bacia de vazamento coincida com o seu. Esse procedimento era realizado, visto que durante a etapa de malhamento, o programa dava indicação do problema “air contact” nas células unitárias que se situavam no topo da bacia (figura 22).

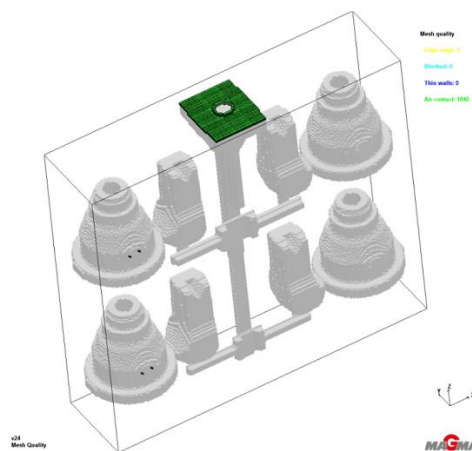


Figura 22 - Representação esquemática da gitagem com “air contact cells” na perspectiva de malhamento.

Tal acontecia porque, de facto, acima do topo da bacia não estava presente areia, mas sim ar, o que de certo modo, comparando com o processo de fabrico faz sentido que assim seja. Para além disso, encontrando-se estas células em contacto com o ar, durante a fase de enchimento, o programa considerará que o escape de gases ocorrerá através destas, o que fará com que durante a solidificação, o arrefecimento se dê por radiação e convecção.

Dessa forma, realizou-se uma simulação com os “inputs” críticos *Standard* e com o topo da bacia a coincidir com o topo da moldação (simulação 10). Analisando os resultados, apresentados na figura 10c, comprova-se que com esta alteração da posição do cacho, se potenciava o aumento de rechupe nas peças e a criação de porosidade, junto da região de ataque na peça 4.

Depois de realizada a análise das simulações supramencionadas, concluiu-se que os parâmetros que deveriam ser fixados para se prosseguir com o estudo da

parametrização seriam a utilização do macho na simulação e o posicionamento do topo da bacia a coincidir com o topo da moldação.

É certo que a consideração destes parâmetros, como explicitado anteriormente, não garantia uma aproximação imediata entre os resultados obtidos na simulação e nas peças reais, porém, sabendo que ambas as variáveis estão presentes no processo de fabrico, é notório que qualquer estudo posterior de parametrização deverá compreender estes dois aspetos. Assim, posto que o macho é parte integrante do processo de fabrico, é de todo o interesse que o mesmo seja considerado na realização da simulação.

Os restantes aspetos, como a composição química e a permeabilidade da areia, provocaram um afastamento entre os resultados das simulações e os reais, sendo que para além disso, perdem interesse e relevo, a partir do momento em que são parâmetros que variam ao longo do processo. Tais parâmetros seriam interessantes considerar se por exemplo, se pretendesse estabelecer uma comparação entre um cacho específico produzido, e uma simulação.

Por último, a classificação da estabilidade do molde como *“Weak sand mold”* comprovou-se que originava defeitos em regiões da peça que não ocorriam na realidade, mais concretamente junto das regiões dos canhões, no caso das peças inferiores.

Assim, foi realizada uma nova sequência de simulações (tabela 5), tendo todas em comum o facto de ser considerado no malhamento a utilização do macho e, de o posicionamento do topo da bacia coincidir com o topo do molde.

Tabela 5 - Sequência de simulações.

Simulação	M. Inoculação	Prec. Grafite	<i>“Treat. Yield” (%)</i>
11	<i>“Very Good”</i>	8	100
12	<i>“Very Good”</i>	7	120
13	<i>“Very Good”</i>	9	100
14	<i>“Very Good”</i>	8	120
15	<i>“Very Good”</i>	8	140
16	<i>“Very Good”</i>	8	140

Relativamente aos resultados da simulação 11 (figura 11c), quando comparados com os da simulação 2 (figura 2c), constatou-se que ocorreu um aumento da percentagem de porosidade presente nas peças. Tal era expectável, posto que, como referido anteriormente, com a utilização de macho e o posicionamento do topo da bacia coincidente com o topo da moldação, se potenciava o aumento da gravidade do rechupe.

No entanto, assistiu-se a uma diminuição significativa de porosidade na peça 3, diminuindo a porosidade presente na zona da flange, de 18% para 10%. Para além disso, verificou-se uma maior semelhança de resultados entre peças do mesmo nível (região da flange), por exemplo, a peça 1 e 3 (nível superior) apresentaram aproximadamente 10%, enquanto que no nível inferior, a peça 2 apresentou uma porosidade de 13% e a peça 4 de 15%.

Desta forma, os resultados obtidos nesta simulação revelaram-se interessantes, na medida em que a gama de valores em que se situam as porosidades detetadas, compreende as que são apenas detetadas por meio de ensaio de Líquidos Penetrantes e por Raios-X, sendo que no nosso caso, as descontinuidades nas peças foram apenas detetadas por ensaio de Líquidos Penetrantes.

No caso da simulação 12, para além de se utilizar os parâmetros em comum com todas as simulações apresentadas na tabela 3, variou-se a eficiência de inoculação, estabelecendo-se um valor de 120%, pelo que se torna interessante comparar os resultados com os obtidos na simulação 1. Comprovou-se que os valores indicados pelo programa, para a região da flange aumentaram, o que demonstrava que seria necessário realizar uma nova simulação com valores de precipitação de grafite e eficiência de inoculação superiores.

Analisando os resultados obtidos com a realização da simulação 13, tendo como referência os obtidos com a simulação 3, comprova-se de facto que houve um aumento muito ligeiro da percentagem de porosidade sentida nas peças (figura 13c).

Assim sendo, os estudos posteriores, não terão em consideração a utilização do fator de precipitação de 9, posto que os resultados obtidos se situam ainda muito distantes da realidade.

Posto que dos resultados analisados, os que mais se aproximavam da realidade eram os obtidos na simulação 11, então considerou-se interessante realizar nova simulação com os mesmo parâmetros, exceto com a eficiência de inoculação, que se decidiu aumentar de 100 para 120% (simulação 14). O objetivo era o de diminuir os valores de percentagem de porosidade, obtidos na simulação 11.

Ora, depois de realizada a simulação, e analisando os resultados apresentados na figura 14c, constata-se que houve uma diminuição geral da porosidade em todas as peças (zona da flange), embora a diferença de resultados entre peças do mesmo nível tenha aumentado. No nível superior, a peça 1 apresenta aproximadamente 10% e a peça 3, 12%, enquanto no nível inferior, a peça 2 apresenta 13% e a peça 4, 14%.

Por forma a comprovar se com novo aumento da eficiência de inoculação se conseguia ter uma aproximação maior com a realidade, decidiu-se realizar nova simulação com um aumento da eficiência para 140% (simulação 15). Convém lembrar que este fator terá influência na equação que permite calcular o número de nódulos de grafite, formados durante a solidificação e que por conseguinte será preponderante na porosidade originada na peça (explicitado na secção de *Consideração dos “Inputs” críticos*).

Depois de analisados os resultados obtidos (figura 15c), constatou-se que se alcançou não só uma aproximação de resultados entre peças do mesmo nível, como também uma maior aproximação com a realidade. De facto, os valores obtidos na simulação, para as peças do nível superior (peças 1 e 3), na zona da flange, foram de aproximadamente 9% e para as peças de nível inferior (peças 2 e 4) de 12%. Tal como referido anteriormente, valores de porosidade compreendidos no *software* até 10%, podem corresponder na prática a defeitos, apenas detetáveis por ensaios de líquidos penetrantes, não sendo no entanto garantido que haja a presença de defeitos. Neste sentido, é notório que os valores alcançados com a realização da simulação 15, mediante os parâmetros estipulados, se encontram muito próximos

dos obtidos na peça, isto tendo em conta que as discontinuidades foram apenas detetadas na peça por ensaio de líquidos penetrantes, de acordo com o referido na secção de *Validação Experimental*.

No entanto, até este ponto, a aproximação de resultados, ocorreu apenas na região da flange, pelo que em todas as simulações se observou a manutenção de rechupes na região do canhão, o que se revela incoerente com a realidade.

Nesse sentido, qualquer aumento posterior da eficiência de inoculação que se considerasse, iria forçosamente não só diminuir a porosidade na região do canhão como também na região da flange, provocando um afastamento de resultados com a realidade. Para além disso, como observado anteriormente, a consideração de um fator de precipitação de grafite de 9, diminuiria em demasia a porosidade originada.

Desta forma, havendo a necessidade de estudar um outro parâmetro que permitisse a remoção da porosidade junto da região do canhão, mas que mantivesse intactas as situadas na flange da peça, julgou-se interessante realizar uma nova simulação (simulação 16), com os mesmos parâmetros da simulação 15, mas com o acrescento de respiros. Em teoria, a utilização dos respiros alivia a pressão sentida no topo das peças, permitindo o escape de gases que poderão originar discontinuidades nessas regiões.

Ao invés de outros componentes, no caso dos respiros, o *Magma5* não permite a atribuição de um “IDLabel” de “vents” a um modelo importado, o que impossibilita que por exemplo se possa modelar os respiros por meio de um *software* CAD 3D, como o *SolidWorks*, se importe em formato *STL*, e se lhe atribua o “IDLabel” respetivo. O que o *Magma5* permite, é a modelação dos respiros no próprio programa (na perspetiva da *Geometria*), sob uma forma cilíndrica, pelo que foi necessário determinar o raio do cilindro a estipular, correspondente à área de secção transversal dos respiros (secção com forma trapezoidal) presentes na placa molde. Ora, segundo a norma interna da empresa, os gitos encontram-se catalogados, consoante a medida da base maior do trapézio (secção transversal), pelo que os canais correspondentes ao respiro são do tipo GF6 (equivalente ao

canal com lado $a = 6\text{mm}$), cuja área pode ser consultada na tabela 2b, presente em *Anexo B*.

De seguida, depois de especificada a área de secção transversal da base do cilindro, foi necessário especificar o ponto inicial e final do respiro. É importante referir que o programa admite que o sentido de escape dos gases, se dá do ponto inicial para o ponto final, pelo que tendo em conta este aspeto, foi necessário atribuir o ponto inicial do respiro ao fundido/ alimentador, e o ponto final a uma altura superior ao topo do bolo. Uma limitação que o programa apresenta é a de não permitir que se criem mudanças de direção nos respiros, pelo se teve de considerar o formato dos respiros de forma distinta da realidade (com uma só direção). Dessa forma, foi necessário aumentar as dimensões do “bolo de areia”, considerado na simulação, caso contrário os respiros teriam sair pela parte lateral do mesmo. O cacho com os respetivos respiros pode ser visualizado na figura 23.

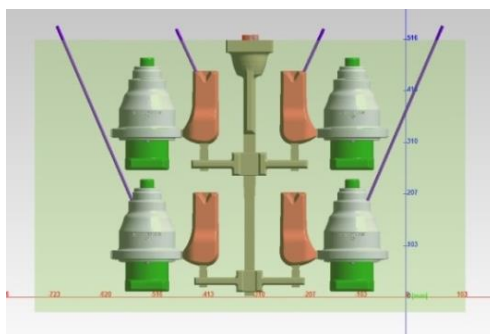


Figura 23 - Representação esquemática da gitagem com os respetivos respiros, na *Perspetiva da Geometria*.

Outro aspeto que foi necessário ter em consideração, foi o de selecionar as opções “*Consider Sand Permeability*” e “*Consider Vents*”, na perspetiva das *Definições da Simulação*, como se pode comprovar na figura 16b (presente em *Anexo B*). A não seleção das duas opções fará com que o programa considere que as cavidades moldantes se encontram totalmente cheias a partir do momento em que os gases passaram pelos respiros, havendo assim o risco de o programa dar por terminada a simulação de enchimento, sem de facto as cavidades moldantes se encontrarem totalmente cheias.

Relativamente aos resultados propriamente ditos (observáveis na figura 16a), com a adição dos respiros não se atingiu o objetivo, que era o de minimizar as porosidades originadas na região do canhão das peças.

Para tentar perceber o porquê de o *software* indicar a presença de porosidade nessas regiões, analisou-se o “*output*” de fração de sólido (“*Fraction Solid*”), por forma a acompanhar a alteração do caminho de alimentação, durante a solidificação. Ora, analisando a figura 17b (presente em *Anexos B*), é possível comprovar que a partir do momento em que o cacho apresenta 65% do seu volume no estado sólido, deixa de haver metal líquido entre a região da flange e do canhão, pelo que não existirá a compensação da contração do metal nesta região. Assim, mediante a análise deste “*output*” é notório que a porosidade formada junto da região do canhão é provocada pelo corte do caminho de alimentação. Depreende-se que é assumido no cálculo efetuado pelo programa, que não existe pressão metalo-estática suficiente para que seja fornecido o metal líquido necessário para compensar a contração do metal (durante a solidificação), no topo da peça. Tal se sucede porque a altura do alimentador é inferior à altura do topo da peça.

Depois de realizada a sequência de simulações referida, conclui-se que os parâmetros que garantem uma maior aproximação entre os resultados apresentados nas simulações (a nível de sanidade) e nas peças produzidas, são os contemplados na simulação 15 (fator de precipitação de grafite de 8, método de inoculação “*Very Good*” e eficiência de inoculação de 140%).

Posto que o estudo efetuado, envolveu a validação experimental em peças que haviam sido produzidas durante a fase de ensaio, bem como a seleção de parâmetros de vazamento, no *software* de simulação, próprios dessa fase, surgiu o interesse de realizar uma simulação, que permitisse avaliar a sanidade das peças, em condições produção.

Para tal, selecionou-se um cacho específico, numa altura em que a referência 3391 já se encontrava em fase de produção e procedeu-se à medição manual do tempo de enchimento de 50 moldações, por forma a se poder calcular um tempo médio real de enchimento do molde. Os tempos medidos perfizeram um tempo médio de 9,7 segundos, o que difere ligeiramente do que havia sido idealizado aquando do *design* do sistema de gitagem (9 segundos).

Ora, analisando os resultados obtidos através dos ensaios de Líquidos Penetrantes, comprovou-se um dado interessante, o do surgimento de microporosidade junto da região do canhão das peças, pelo vem validar a previsão efetuada pelo programa, que não havia sido comprovada nas peças analisadas durante a fase de ensaio (figuras 1e a 4e, presentes em *Anexo E*).

Posto isto, depois de alcançado o tempo médio de enchimento, e de se ter realizado a análise de um cacho específico por meio de ensaios de Raio-X e de Líquidos Penetrantes, realizou-se nova simulação, com os parâmetros considerados ideais (contemplados na simulação 15) com a nuance de que desta vez, nas definições da simulação relacionadas com o enchimento, não se utilizou a curva de pressão (explicitada na secção de definições da simulação - vazamento), mas antes um tempo de enchimento específico, que neste caso se considerou o tempo médio alcançado, os 9,7 segundos.

Os valores de percentagem de porosidade obtidos, com a realização desta simulação, diferem dos obtidos na simulação 15, principalmente se se comparar os valores de porosidade apresentados, na região da flange, das peças 1 e 3. Enquanto no primeiro caso (simulação 15) os valores apresentados para as peças 1 e 3, são de aproximadamente 9%, no caso da simulação 17, são de 6 e 4%. Relativamente às peças 2 e 4, os valores apresentados são muito próximos: na simulação 15 o valor indicado é de $\approx 12\%$ e na simulação 16 é de $\approx 13\%$.

No entanto, à imagem do que se sucede em todas as simulações anteriormente realizadas, os valores de porosidade indiciados para a região do canhão são bastante elevados (na gama da macroporosidade, que não se verificou experimentalmente). Posto que estes valores são superiores aos apresentados junto da região da flange, então qualquer variação dos *Inputs* críticos, iria potenciar a diminuição da porosidade, nesta zona, em demasia.

Nesse sentido, conclui-se que também para o caso do estudo da gitagem durante a fase de produção, a utilização dos parâmetros estipulados na simulação 15, são os que garantem uma maior proximidade com a realidade.

3.4.2. Referência 3394

Com o intuito de verificar se a utilização dos parâmetros, considerados ideais, é válida também para simulações que englobem o componente *Cover*, realizaram-se as simulações apresentadas na tabela 6. Posto que na simulação 18 se utilizaram os mesmos parâmetros que na simulação 15, considerou-se também a utilização de macho e fez-se coincidir o topo da bacia com o topo da cavidade de moldação.

Tabela 6 - Sequência de simulações.

Simulação	M. Inoculação	Prec. Grafite	" <i>Treat. Yield</i> " (%)
18	" <i>Very Good</i> "	8	140
19	" <i>Very Good</i> "	7	100

Após a realização da primeira simulação, detetaram-se valores de porosidade acima do esperado, tendo em conta que os parâmetros utilizados, foram os que garantiam, nas referências anteriores, uma maior proximidade com a realidade. Nesse sentido, decidiu-se realizar uma análise através dos "*Outputs*" "*Velocity*" e "*Fill Tracer*", por forma a verificar eventuais anomalias durante a fase de enchimento. De facto, comprovou-se que ocorria a passagem de metal líquido directamente do gito de descida para os alimentadores das peças 1 e 5, antes de passar pelas lâminas de ataque (figura 18b, presente em *Anexo B*). Note-se que a irregularidade do alimentador 1, foi apenas detetada por meio da análise do "*Output*" "*Velocity*", posto que, por forma a agilizar a realização da simulação, se utilizou um número de "*Tracers*" reduzido (três "*Tracers Points*"), o que impedia que o trajeto do metal líquido fosse simulado com grande exatidão.

Depois de uma análise profunda da malha gerada, comprovou-se que o número de células entre os componentes supramencionados era muito reduzido, pelo que como solução optou-se por realizar uma nova simulação, aumentando o número de malha para 10 milhões (vide figura 24). No final da simulação, comprovou-se que o problema havia sido solucionado, com a alteração deste parâmetro de malha (vide figura 19b, presente em *Anexo B*).

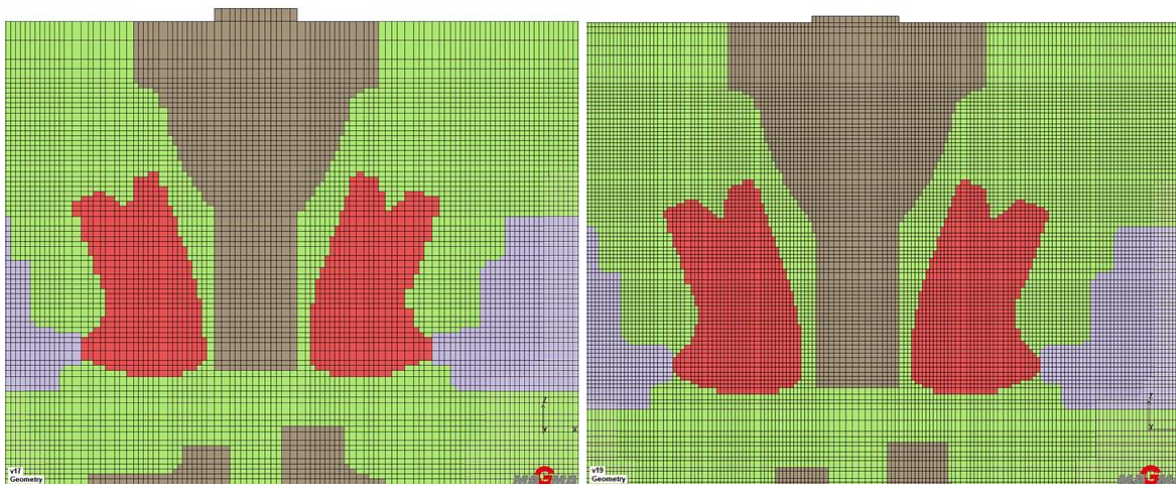


Figura 24 - Perspetiva da malha antes (à esquerda) e depois (à direita) da alteração do número de células.

Ora, analisando os resultados obtidos com a realização da simulação 18, e tendo em linha de conta a microporosidade verificada apenas através de ensaios de Líquidos Penetrantes (imagens dos resultados experimentais da respetiva referência em Anexos), comprova-se que a utilização dos parâmetros, considerados ideais no estudo da parametrização da referência 3391, são válidos também para a simulação deste tipo de peças. Isto porque os valores indicados pelo *software*, de acordo com a tabela 2, são coerentes com a microporosidade detetada apenas por Líquidos Penetrantes. Para além disso, comparativamente com os resultados obtidos com a simulação *standard* (simulação 19 que compreende os parâmetros utilizados pela empresa), a proximidade do que é indicado na simulação é significativamente superior. Por exemplo, a peça 1 da simulação 1 apresenta um valor de porosidade de aproximadamente 5%, enquanto a peça da mesma posição na simulação 2, apresenta um valor de 44%.

3.4.3. Referência 3390

O plano de simulações utilizado para o estudo de parametrização desta referência, contemplou a mesma variação de parâmetros que a empregue na referência 3394.

No entanto, também depois de realizada a primeira simulação alusiva a esta referência, verificou-se que, comparativamente com o obtido experimentalmente nas peças (*Anexos D e E*), existiam incongruências relativamente ao posicionamento das porosidades indicadas. Enquanto na simulação era indicada a presença de porosidades junto da região de ataque à peça, nos resultados obtidos por ensaio de Líquidos Penetrantes, era apenas visível a presença de microporosidade na região

da flange, oposta à zona de ataque (à semelhança do que se sucede na referência 3391).

Depois de consideradas potenciais causas para esta discrepância de resultados, verificou-se que havia células unitárias, dentro do volume dos alimentadores, que possuíam o “*ID Label*” respeitante ao canal de distribuição. Tal se sucedia porque, na etapa da modelação da gitagem, por meio do *software* de desenho 3D, *Solidworks*, ao utilizar a função de “*Extrude*” para realizar a extrusão dos canais, estendeu-se em demasia os mesmos para o interior dos alimentadores. Idealmente, os dois componentes deveriam estar ligados apenas pelas superfícies de contacto, no entanto, como as células unitárias se encontram sob forma cúbica, e as superfícies de ambos os componentes são curvilíneas, existiria sempre espaço vazio entre as células de ambos os componentes. Nesse sentido, é sempre necessário estender os canais para dentro dos componentes, tendo em atenção que se está a acrescentar um fator de erro, que é o de atribuir células relativas à gitagem ao interior do alimentador. Como solução, diminui-se a extensão da operação de extrusão realizada. Na figura 25, estão apresentadas as malhas geradas, antes e depois da operação.

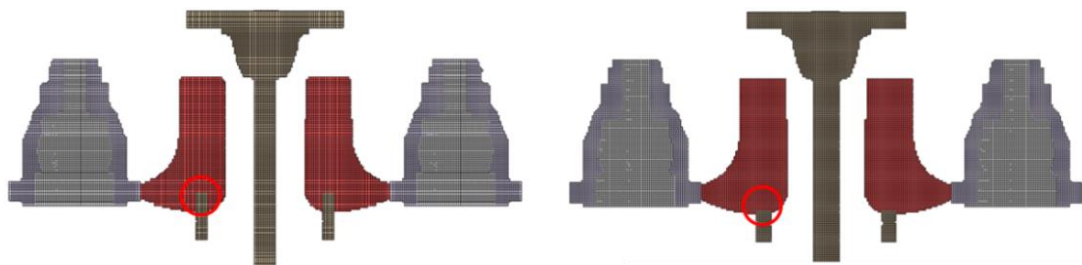


Figura 25 - Perspetiva da malha antes (à esquerda) e depois (à direita) da alteração da extensão dos canais.

Para além deste aspeto, verificou-se que a malha gerada, não compreendia células unitárias de forma simétrica, pelo que se deduziu que tal era provocado por aquando da etapa de malhamento, se especificar um número de células ao invés de especificar a medida de cada aresta (vide figura 26). É importante salientar que uma vez que esta solução originava um aumento significativo do número de células, que se repercutia na duração da simulação, foi considerada esta solução, apenas na realização da simulação 22.

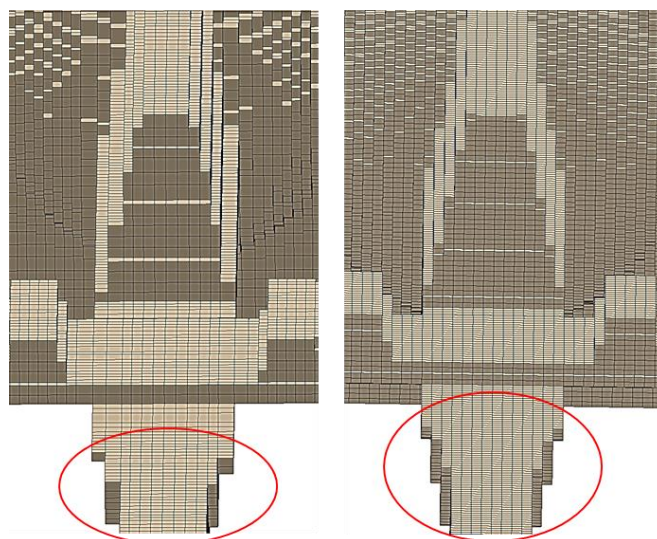


Figura 26 - Perspetiva da malha antes (à esquerda) e depois (à direita) da alteração dos parâmetros de malha.

Tabela 7 - Sequência de simulações.

Simulação	M. Inoculação	Prec. Grafite	" <i>Treat. Yield</i> " (%)
20	" <i>Very Good</i> "	8	140
21	" <i>Very Good</i> "	7	100
22	" <i>Very Good</i> "	8	140

Com a realização das simulações apresentadas na tabela 7, constatou-se que embora a geometria dos componentes, bem como do sistema de gitagem, desta referência, seja distinta da referência 3391, garantiu-se uma maior aproximação de resultados com a utilização dos parâmetros contemplados na simulação 20 (parâmetros considerados ideais).

De facto, por simples observação da figura 33c, presentes em anexos, comprova-se que os valores de porosidade indicados pelo *software*, na simulação 20 para a região da flange, são inferiores a 10%. De acordo com a tabela 2, os valores indicados encontram-se compreendidos entre a gama de valores que prevê a presença de microporosidades em peças, apenas detetável por ensaio de L.P., o que se revela congruente com os resultados obtidos experimentalmente.

Para além disso, com a realização da simulação *standard* (simulação 21), surge novamente a presença de porosidades na região próxima do ataque, que é algo que não surge nas peças reais e que aliás levou a que se fizessem as alterações de malha descritas anteriormente.

Relativamente à simulação 22, a realização da mesma teve como objetivo, verificar se a alteração dos parâmetros de malha anteriormente referidos, permitiam posicionar a porosidade originada, de forma simétrica, em peças do mesmo nível. Assim, comparando os resultados dessa simulação (figura 35c e 37c, em *Anexo C*) com os da simulação 20 (figura 36c e 38c), verifica-se que não houve alterações significativas, o que associado ao elevado tempo de execução da simulação (aproximadamente 7 dias) torna a realização de simulações, com a especificação da medida das arestas das células.

3.4.4. Referência 3393

À semelhança das referências 3394 e 3390, também neste caso, a estratégia empregue passou por comparar os resultados obtidos com a realização das simulações segundo os parâmetros *Standard*, utilizados pela empresa, e os parâmetros considerados ideais (tabela 8).

Tabela 8 - Sequência de simulações.

Simulação	M. Inoculação	Prec. Grafite	“ <i>Treat. Yield</i> ” (%)
23	“ <i>Very Good</i> ”	8	140
24	“ <i>Very Good</i> ”	7	100

Uma vez mais, comprovou-se que com a utilização dos parâmetros contemplados na simulação 23 (parâmetros ideais) se conseguia ter uma maior proximidade de resultados relativamente ao obtido experimentalmente, isto tendo sempre em linha de conta a gama de valores compreendida na tabela 2.

3.5. Parametrização *Flow-3D*

Paralelamente ao estudo de parametrização do programa *MagmaSoft*, surgiu o interesse de comprovar se com a utilização do *software* de simulação *Flow-3D* se conseguia alcançar valores de tempo de enchimento, da referência 3391, mais próximos com a realidade, comparativamente com os indicados pelo *MagmaSoft*.

Para tal, tendo em conta os parâmetros explicitados na secção de “*Funcionalidades do programa - Flow-3D*” realizaram-se três simulações distintas, das quais se verificou que o tempo de enchimento indicado variou.

Salienta-se que para todas as simulações, utilizou-se exatamente a mesma curva de pressão, que havia sido definida nas simulações realizadas no *Magmasoft*, caso contrário estaria a ser estipulado um parâmetro de entrada distinto, que poderia ser responsável por uma velocidade de enchimento diferente. Essa curva de pressão foi definida para a parte superior da malha, coincidente com o topo da bacia (vide figura 1f).

Nesse mesmo sentido, pensou-se inicialmente em utilizar os parâmetros físicos associados ao ferro fundido *GJS-500* do *Magmasoft*, no *Flow-3D*, contudo, após rápida análise comprovou-se que havia parâmetros considerados no *Flow-3D* que não eram considerados no *Magma*, pelo que se optou por seleccionar o grau de ferro correspondente no *Flow-3D*.

3.5.1. Simulação 1

Para a realização desta simulação, utilizaram-se os parâmetros indicados no *Tutorial de aprendizagem* [14].

Desta forma, classificou-se na “*Geometry tree*” cada componente (como “*Solid*” e “*Hole*”) do modo apresentado nas figuras 2f, 3f e 4f (*Anexo F*).

Uma particularidade deste *software* é que, ao invés do que se sucede por exemplo no *SOLIDCast* e no *MagmaSoft*, o *Flow-3D*, não permite a criação de um “*inlet*”, que como explicitado anteriormente, tem como função dar indicação do caminho de entrada do metal líquido.

Dessa forma, realizou-se o procedimento padrão, que foi o de posicionar o topo da bacia acima do limite superior da malha, pois como referido anteriormente, o *software* considera a região exatamente acima do limite da malha, como a zona de entrada de metal líquido. Como parâmetro de malha, especificou-se o número de células unitárias. A malha gerada encontra-se apresentada na 5f.

3.5.2. Simulação 2

A única alteração a que se procedeu para a realização da simulação, foi o posicionamento de um bloco cilíndrico no topo da bacia, com o mesmo diâmetro do “*Inlet*” estipulado no *Magma*, que por sua vez havia sido criado, tendo em consideração o diâmetro da bica da banheira de vazamento. Assim, realizando a

operação de baixar a altura do limite superior da malha, o programa deixaria de considerar como caminho de entrada do metal líquido, a área de secção transversal da bacia, colinear com o plano de corte da malha, para considerar a área de secção transversal do bloco cilíndrico. A malha da simulação encontra-se apresentada nas figuras 6f.

3.5.3. Simulação 3

Como referido anteriormente, uma limitação que o programa *MagmaSoft* apresenta é a de não possibilitar que se importe um modelo 3D e se lhe atribua um “*Label*” de “*Vents*”. No caso do *Flow-3D*, tal é possível (vide figura 7f). Para tal, foi necessário criar mais que uma malha, por forma a se poder especificar a pressão de entrada (sentida na bacia) e a pressão atmosférica (nos respiros). Por forma a garantir que as malhas geradas não apresentassem problemas de ligação entre as células, optou-se por especificar a medida da aresta das mesmas. Para além disso, foi necessário ter em atenção o posicionamento de cada uma das malhas, de forma a que células de diferentes malhas tivessem perfeitamente em contacto (vide figura 8f).

3.6. Apresentação e discussão de resultados

Os tempos de enchimento alcançados em cada simulação, para a referência 3391, encontram-se apresentados na tabela 9.

Tabela 9 - Tempos de enchimento

Simulação	Tempo de enchimento (s)
1	7,8
2	8,1
3	8,8

Ora, tendo em conta que a alteração efetuada entre a simulação 1 e a simulação 2 foi a diminuição da área de entrada de metal líquido (vide figuras 9f e 10f), com a manutenção da curva de pressão, é notório que o caudal de metal líquido diminui, pelo que daí se percebe que o tempo de enchimento aumente.

Com a utilização de respiros, verificou-se um aumento do tempo de enchimento que pode ser explicado pelo facto de haver um maior volume de espaço a ser preenchido pelo metal líquido (vide figura 11f).

Na tabela 10 estão apresentados os tempos de enchimento teórico (indicado aquando do cálculo do sistema de gitagem) e real (tempo médio de 50 moldações), e os indicados pelo *Magmasoft* e pelo *Flow -3D*.

Tabela 10 - Tempos de enchimento expressos em segundos.

Teórico	Real	<i>Magmasoft</i>	<i>Flow3D</i>
9,0	9,7	10,1	8,8

Analisando os resultados denota-se um aspeto interessante: uma proximidade de valores entre o tempo teórico estabelecido aquando do cálculo do sistema de gitagem e o tempo estimado de enchimento através do *Flow-3D* e outra proximidade entre o tempo estimado pelo *Magmasoft* (vide figura 20b, presente em *Anexo B*) e o tempo médio de enchimento obtido na fábrica.

Ora, o cálculo efetuado pelo *Magmasoft* tem em consideração certos parâmetros físicos, que não são levados em conta no cálculo efetuado para o dimensionamento da gitagem, e que se verificam na situação de fabrico, tais como:

- é considerada a viscosidade do banho metálico durante o enchimento;
- é levada em linha de conta a fricção entre o banho metálico e as cavidades da moldação, enquanto nos cálculos efetuados manualmente, apenas se considera um fator de fricção fixo para todo o sistema de gitagem;
- considera-se que ocorre a perda de pressão em todas as zonas da cavidade de moldação (havendo ainda um acréscimo dessa perda em zonas em que existe a mudança de direção do banho metálico, algo que não está contemplado nos cálculos efetuados manualmente).

Assim sendo, compreende-se que o tempo estimado pelo *Magmasoft* esteja mais próximo do tempo real, do que o tempo teórico previsto.

Relativamente ao tempo de enchimento apresentado pelo programa *Flow-3D*, verifica-se o fenómeno inverso. Ora, tendo em conta que o estudo dos parâmetros

a considerar neste programa foi menos aprofundado que o sucedido no programa *MagmaSoft*, conclui-se que, tratando-se o *Flow-3D* de um programa que admite a especificação de variadíssimos parâmetros físicos, seria necessário um estudo mais profundo. Esse estudo, à semelhança do explicitado na seção *Planificação de simulações*, deverá assentar num *DOE* (“*Design of Experiments*”) dinâmico, que permita a incorporação de inúmeras variáveis independentes, com vários níveis de valores.

4. Conclusão

1. Com a realização do presente trabalho, constatou-se que os parâmetros que permitem a obtenção de resultados mais próximos com a realidade são o valor de fator de precipitação de grafite de 8, classificação de método de inoculação “*Very Good*”, eficiência de inoculação de 140%, a consideração do macho aquando da criação da malha e, o posicionamento do topo da bacia coincidente com o topo do molde de areia. Desta forma, é possível afirmar, que tendo em conta o estudo efetuado, o método de inoculação empregue pela empresa é mais eficiente que o padronizado pelo programa *MagmaSoft*, como “*Very Good*”.
2. No entanto, verificou-se que a diferença de resultados entre as condições *Standard* e ideais variava ligeiramente de referência para referência, pelo que se depreende que para cada sistema de gitagem específico, deverá ser realizado um estudo de parametrização adequado. De forma a aprofundar o estudo da parametrização, constata-se que seria interessante realizar uma análise estatística sobre os resultados obtidos de várias referências, posto que permitiria comprovar a variância de resultados entre as peças reais e as simulações.
3. Para além dos parâmetros acima referidos, concluiu-se que em operações de malhamento que envolvam sistemas de gitagem, torna-se irrelevante perceber se a especificação da medida de cada aresta da célula soluciona a questão da assimetria de porosidades, apresentada em peças do mesmo nível. Isto porque a sua especificação, provoca um aumento significativo do número de células compreendidas na malha, que se repercute num aumento considerável da duração da simulação, pelo que a sua implementação torna-se inviável.

4. Outro aspeto a ter em conta é o de durante a modelação do sistema de gitação através de um *software CAD 3D*, em que se utiliza a função de "Extrusion" para estender os canais, ter especial atenção para não estender em demasia para dentro de cada componente (por exemplo os canais de ataque para dentro das peças e os canais de distribuição para dentro dos alimentadores). No caso da referência 3390, por exemplo, a solução passou por diminuir o comprimento do canal de distribuição que se encontrava presente dentro do alimentador, o que levava a que estivessem presentes células do canal de distribuição dentro do alimentador, que deveriam pertencer ao mesmo.
5. Relativamente à análise do comportamento de enchimento, realizada através do *Magmasoft* e do *Flow-3D*, conclui-se que o que indica um valor de tempo de enchimento mais próximo do real é o *Magmasoft*.
6. Por último, é importante ter em mente que um *software* de simulação que esteja devidamente parametrizado e que indique resultados muito idênticos com a realidade, nunca considerará alterações que se possam verificar no processo de fabrico, pelo que deverá ser realizada uma validação constante e periódica dos "Inputs" críticos.

5. Sugestões para futuros trabalhos

No seguimento do trabalho, crê-se que seria relevante, por ordem a alcançar uma melhor eficácia do estudo de parametrização, tomar o seguinte conjunto de ações:

- realizar o estudo de parametrização para várias referências, de forma a que com essa recolha de informação, se consiga estabelecer uma análise estatística que indique valores padrão para cada "Input" crítico;
- estabelecer um procedimento padrão para o estudo de parametrização;
- efetuar um estudo mais profundo do *software Flow-3D*, que permita a incorporação de mais parâmetros de entrada;
- realizar uma validação comparada entre o *Magmasoft* e outros programas de simulação de solidificação como *SolidCast* com o *ProCast*;

- elaborar um catálogo que faça corresponder os valores de porosidade indicados pelo *Magmasoft* às diversas gravidades de porosidade, especificadas pela empresa;
- fazer um estudo de parametrização de um sistema de gitação, no *Magmasoft*, com a atribuição de “*ID Labels*” distintos para a bacia de vazamento, filtro e canal de ataque.

6. Referências bibliográficas

- [1] Sun, Z., *Numerical Optimization of Gating Systems For Light metals Sand Castings*, in *Applied Science* 2007, University of Windsor.
- [2] Sakthi group, India. 2010; Available from: <http://www.sakthigroup.com/auto.html>.
- [3] Sakthi Portugal. 2015 ; Available from: <http://www.sakthiportugal.pt/>.
- [4] Association, Foundry Technology. 2015; Available from: http://www.foundrytechnology.co.uk/list/info.php?page_id=12 .
- [5] Jiyang, Z., *Colour Metallography of Cast Iron*, February 2009, China Foundry.
- [6] Santos H: Aula 15 a 18 - Ferros Fundidos disponível em Conteúdos da disciplina Materiais Metálicos.
- [7] Busch, J.C.S.a.G., *Cast Iron - a predictable material*, in *WFC Paper*. 2011, Magma Giessereitechnologia GmbH, Aachen, Germany.
- [8] *Manufacturing Technology*. Fourth ed. Foundry, Forming and Welding. Vol. 1. 2013: McGraw Hill Education (India) Private Limited.
- [9] MAGMASOFT Version 5.2; MAGMA Help Contents.
- [10] Finite Solutions Inc., Getting Started with the SolidCast - Casting Simulation System Version 8.2.5.
- [11] Akar, N.; ahin, H. Mehmet; Yalçın, N.; Kocatepe, K. . *Experimental Study on the Effect of liquid Metal Superheat and Casting Height on Interfacial Heat transfer Coefficient*”; *Experimental Heat Transfer*, 2008.
- [12] Silva Ribeiro, C.A., Apontamentos da disciplina de Projeto (2014/2015) do MIEEM, 2015.
- [13] Silva Ribeiro, C.A, Apontamentos da disciplina de fundição (2013/2014) do MIEEM 2013.
- [14] Flow-3D Version 11.0.3; Tutorial;

[15] Paula M. Melo e Castro; *MÉTODO DE TAGUCHI: CONTROLO DE QUALIDADE COM RECURSO NÃO-CONVENCIONAL AO DESENHO ESTATÍSTICO DE EXPERIÊNCIAS (DOE)*; Instituto Nacional de Estatística.

[16] University of Massachusetts Amherst. Available from: <http://www.ecs.umass.edu/mie/labs/mda/fea/sankar/chap2.html> .

7. Anexos

Anexo A - Imagens de apoio à revisão bibliográfica;

Anexo B - Complementos do procedimento;

Anexo C - Resultados da análise da sanidade das peças por meio do Software de simulação MagmaSoft;

Anexo D - Resultados da análise da sanidade das peças através de ensaio de Raio-X;

Anexo E - Resultados da análise da sanidade das peças através de ensaio de Líquidos Penetrantes;

Anexo F - Perspetivas de malha e resultados de enchimento indicados pelo Flow3D.

Anexo A

Imagens de apoio à revisão bibliográfica

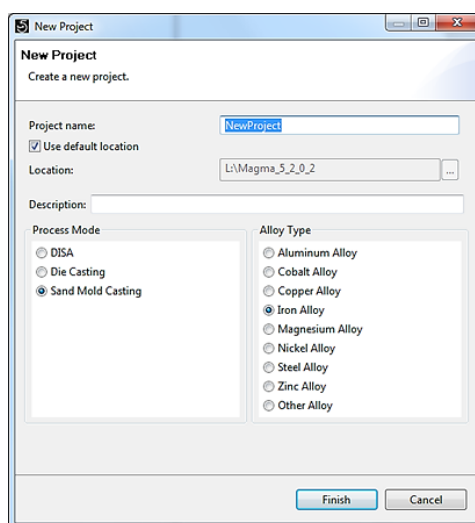


Figura 1a - Janela de atribuição de processo e de liga [9].

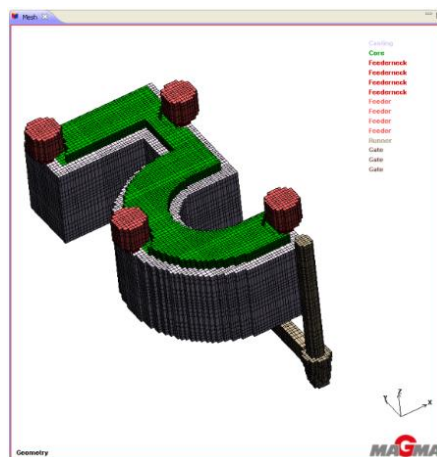


Figura 2a - Vista do modelo 3D, com malhamento e os materiais correspondentes [9].

Material	Met Id	Database/File name	Initial Temperature (°C)	Iron Composition
Cast Alloy		MAGMA/GIS-500	1400.0	C (Carbon) 3.6 % Ce (Cerium) 0.0 % Cr (Chromium) 0.0 % Cu (Copper) 0.5 % Mg (Magnesium) 0.036 % Mn (Manganese) 0.13 % Mo (Molybdenum) 0.006 % N (Nitrogen) 0.0 ppm Ni (Nickel) 0.035 % P (Phosphorus) 0.017 % S (Sulfur) 0.02 % Sb (Antimony) 0.0 % Si (Silicon) 2.6 % Sn (Tin) 0.0 %
Casting				
Sand Mold				
Sand Mold	ID 1	MAGMA/Green_sand	40.0	

Figura 3a - Janela de seleção da liga a vazar e do material de moldação [9].

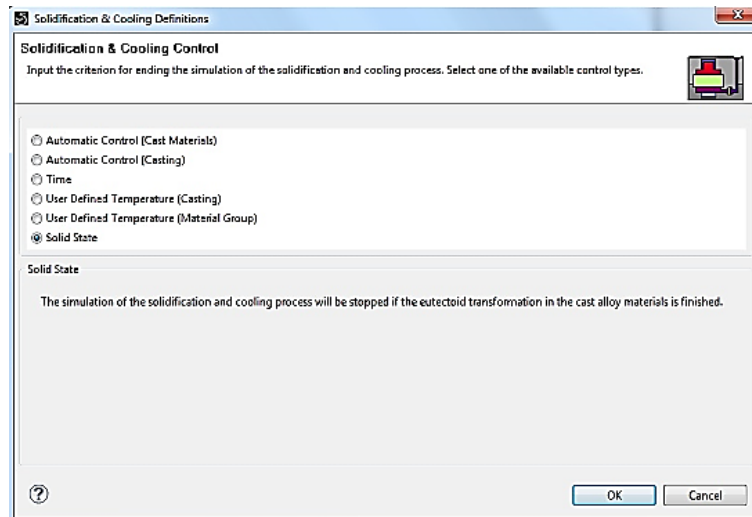


Figura 4a - Janela de seleção de término da simulação [9].

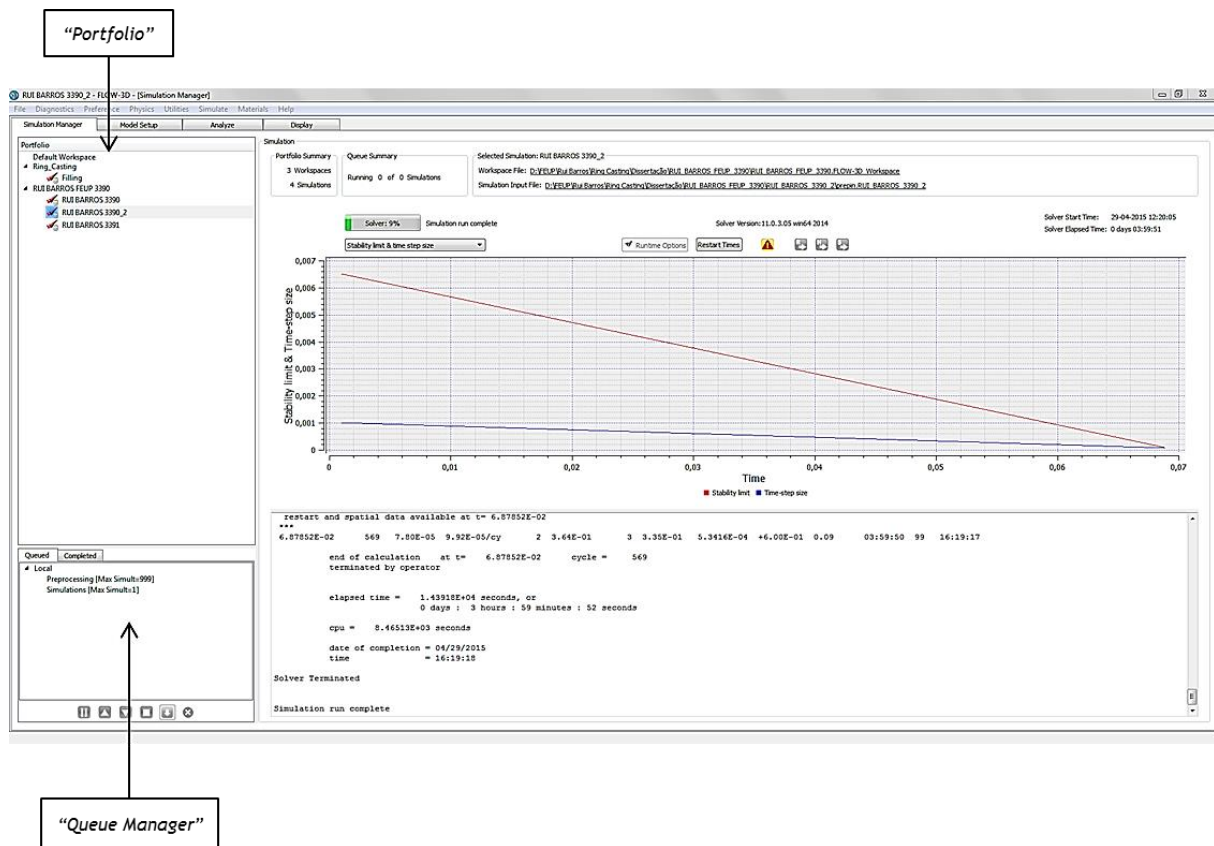


Figura 5a - Interface do separador "Simulation manager" [14].

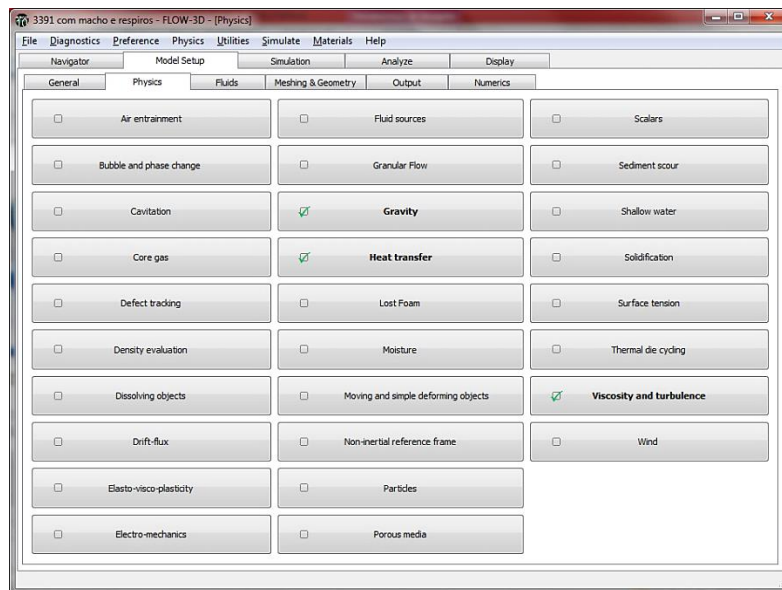


Figura 6a - Interface do separador “Physics” [14].

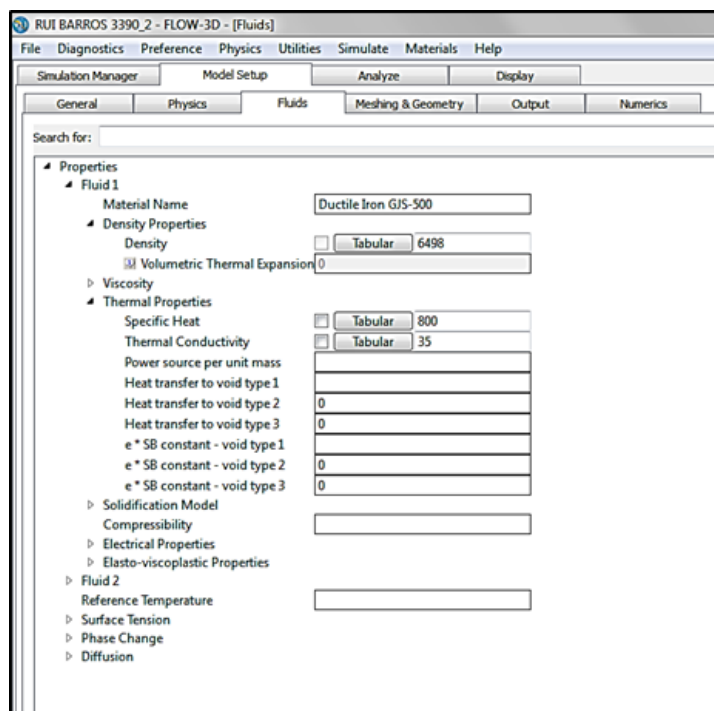


Figura 7a - Interface do separador “Fluids” [14].

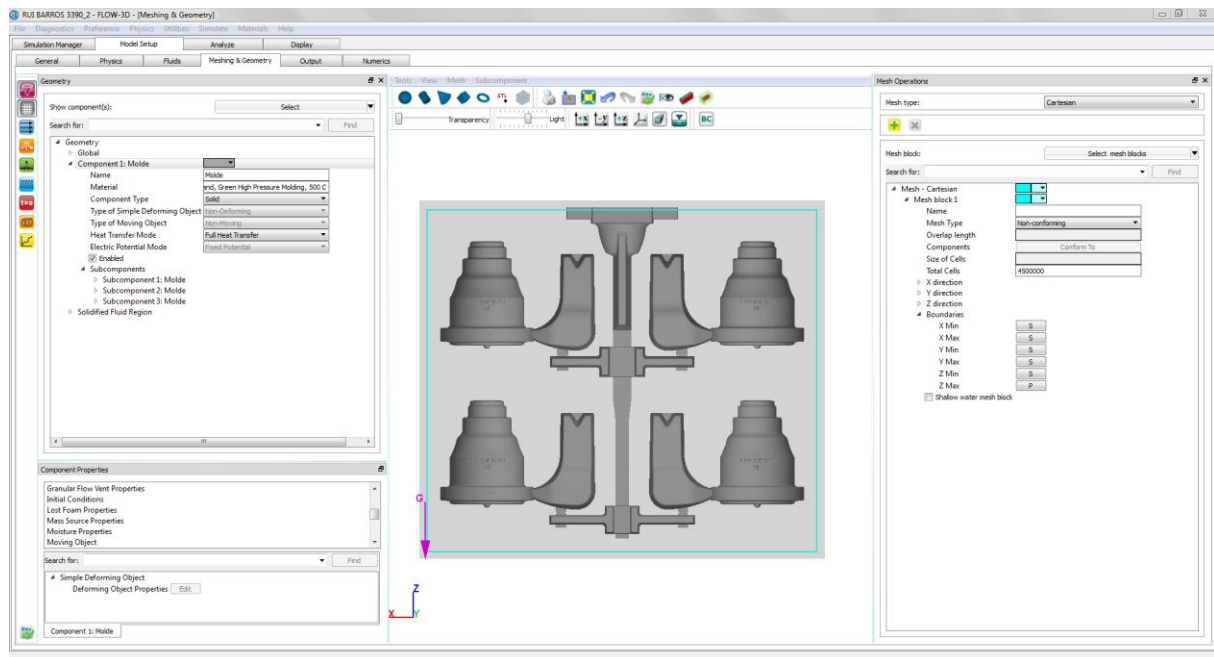


Figura 8a - Interface do separador “Meshing & Geometry” [14].

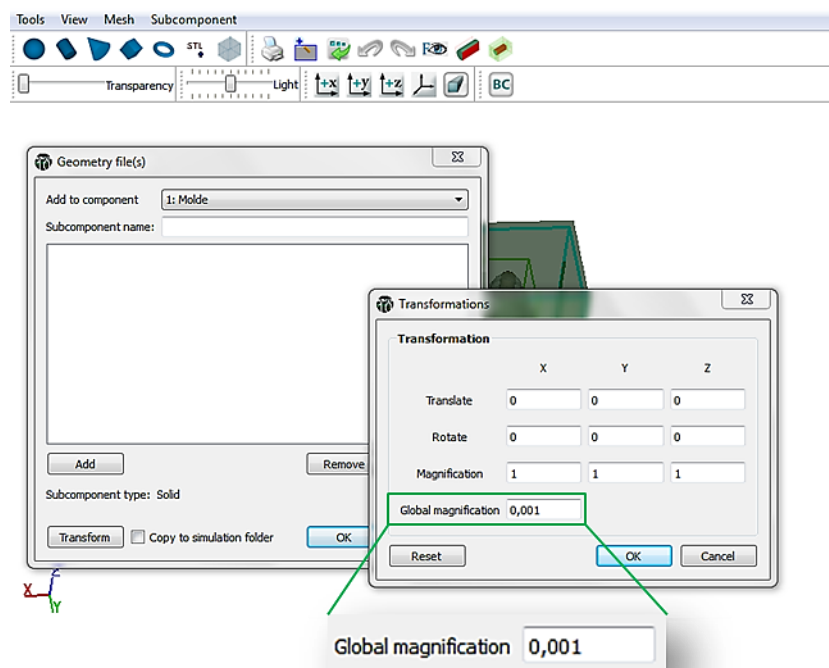


Figura 9a - Janela que permite a alteração da escala, aquando da importação dos componentes em formato STL [14].

Anexo B

Complementos do procedimento

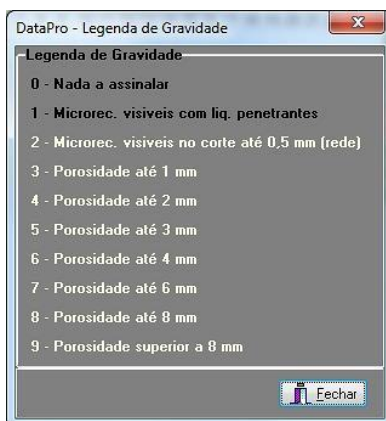


Figura 1b - Representação dos diferentes níveis de gravidade.

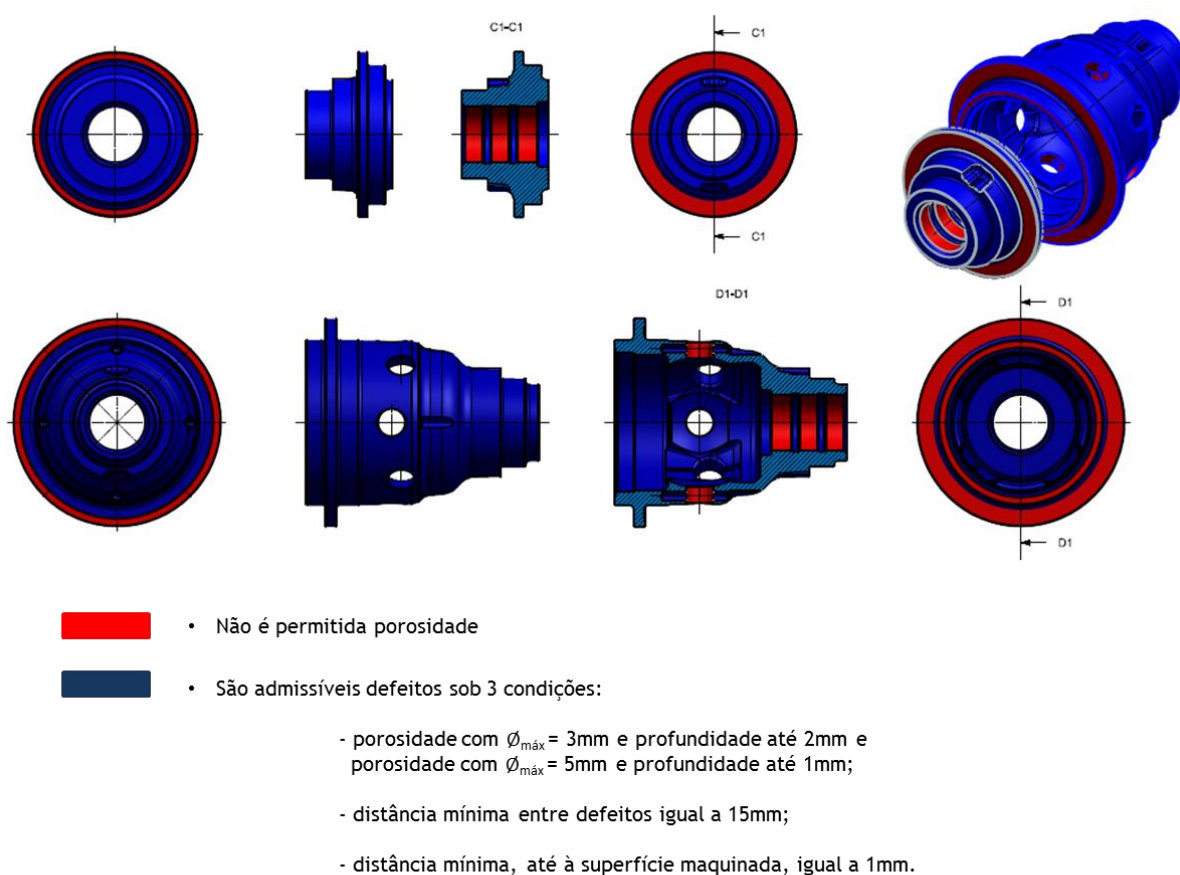


Figura 2b - Representação esquemática com as várias vistas da peça e respetivas gravidades admissíveis.

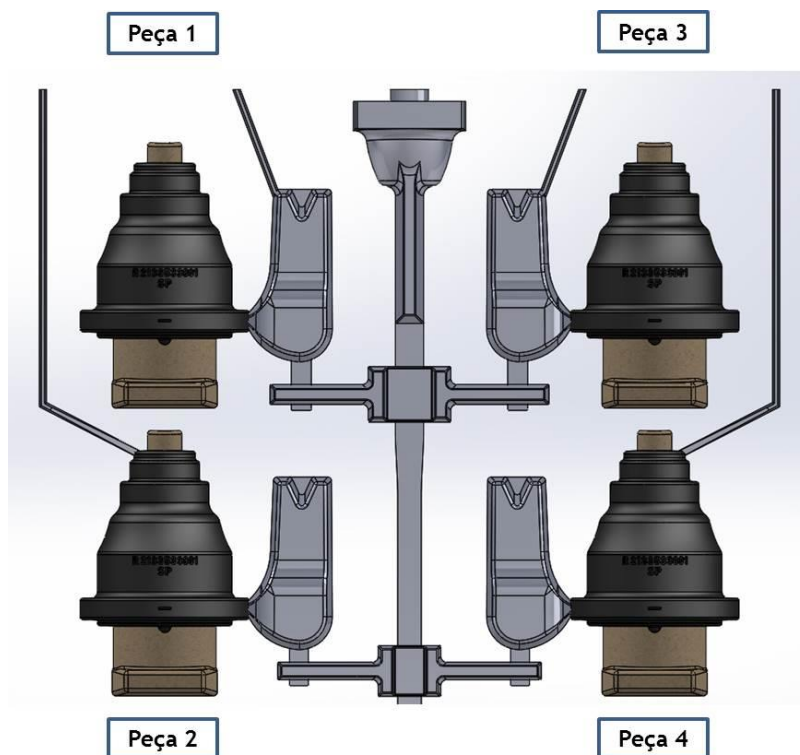


Figura 3b – Vista de frente do sistema de gitagem da referência 3391.

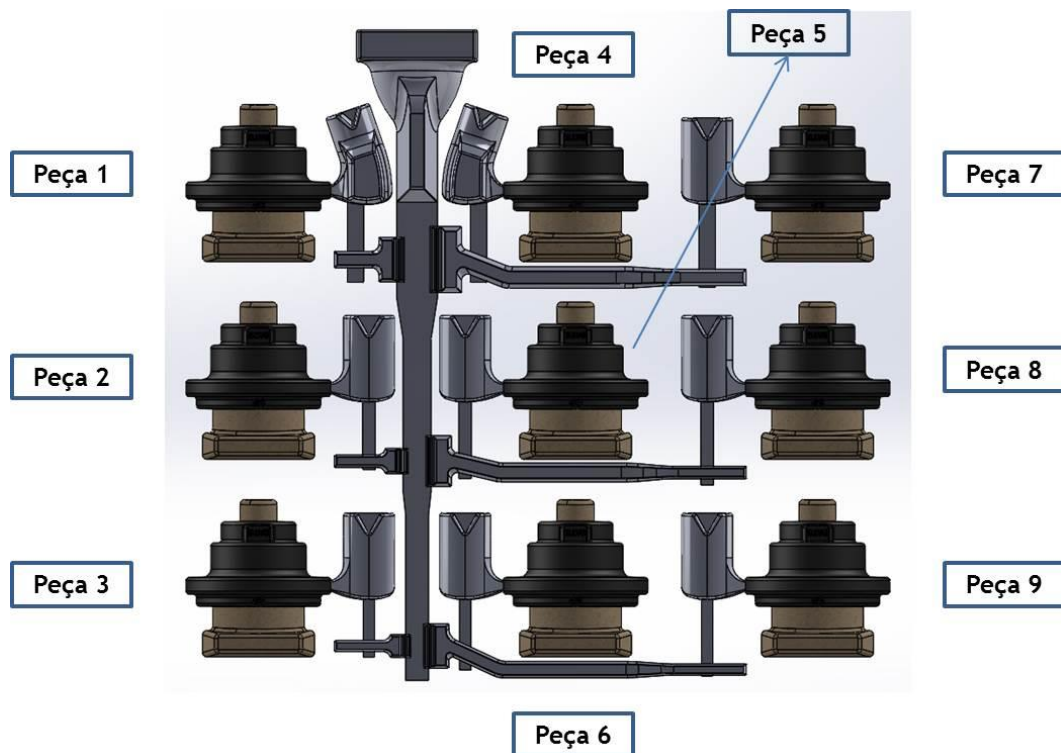


Figura 4b - Vista de frente do sistema de gitagem da referência 3394.

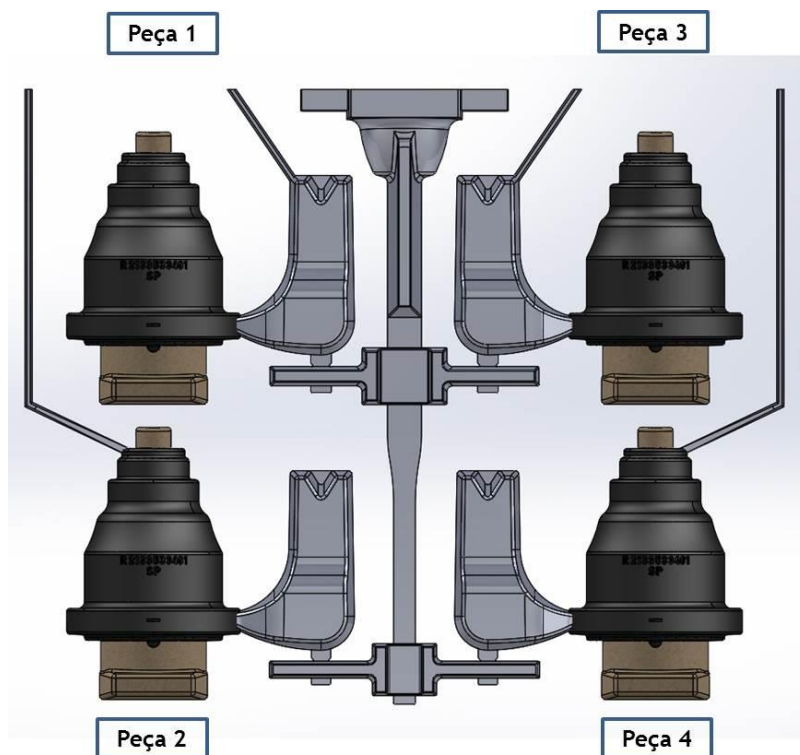


Figura 5b - Vista de frente do sistema de gitagem da referência 3390.

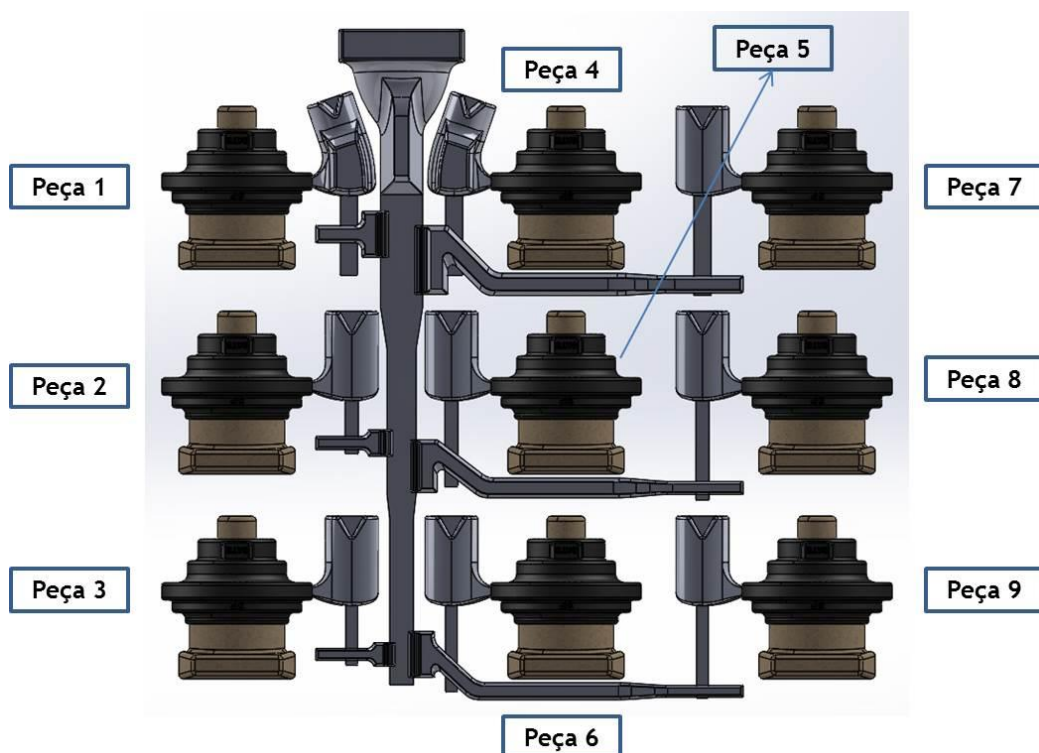


Figura 6b - Vista de frente do sistema de gitagem da referência 3393.

Tabela 1b - Valores de pressão e caudal.

Pressão [mbar]	Caudal [Kg/s]	Caudal [cm³/s]
5	2,14	296,71
10	3,02	419,62
20	4,27	593,43
25	4,78	663,4
30	5,23	726,80
35	5,65	785,03
40	6,04	839,23
45	6,41	890,14
50	6,76	938,29
55	7,09	984,09
60	7,40	1027,85
65	7,70	1069,82
70	7,99	1110,20
75	8,27	1149,17
80	8,55	1186,85
85	8,81	1223,38
90	9,06	1258,85
95	9,31	1293,35
100	9,55	1326,94
110	10,02	1391,71

$$1 \text{ Kg/cm}^2 \approx 1 \text{ Bar}$$

$$\text{Pressão} = \text{altura} \times \text{densidade}$$

$$\text{Altura} = \frac{\text{velocidade}^2}{2 \times g}$$

$$\text{Velocidade} = \text{Caudal} / \text{área}$$

$$A = \pi r^2$$

$$h = \frac{v^2}{2 \times g}$$

$$V = \frac{Q}{A}$$

Figura 7b - Fórmulas de cálculo utilizadas na tabela.

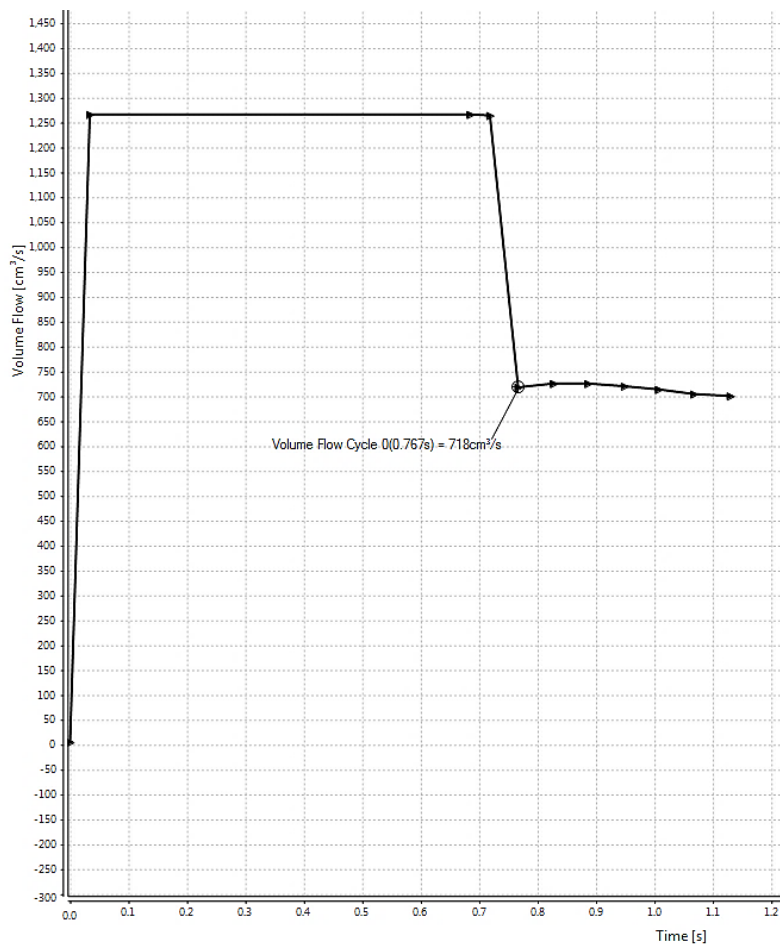


Figura 8b - Gráfico de curva de fluxo.

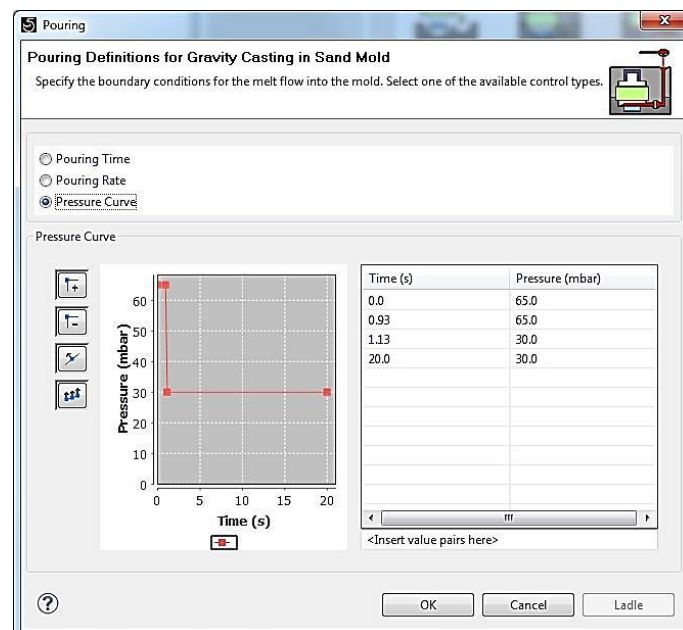


Figura 9b - Representação da curva de pressão final da referência 3394.

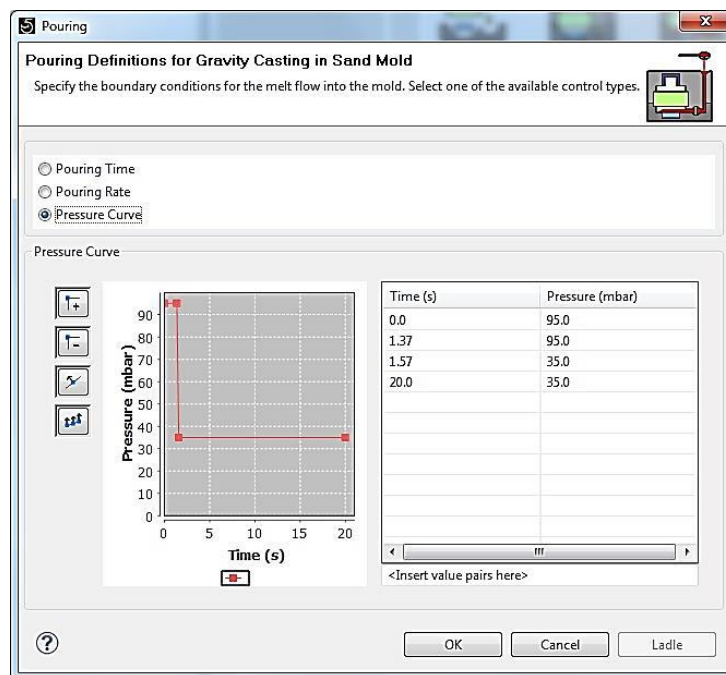


Figura 10b - Representação da curva de pressão final da referência 3390.

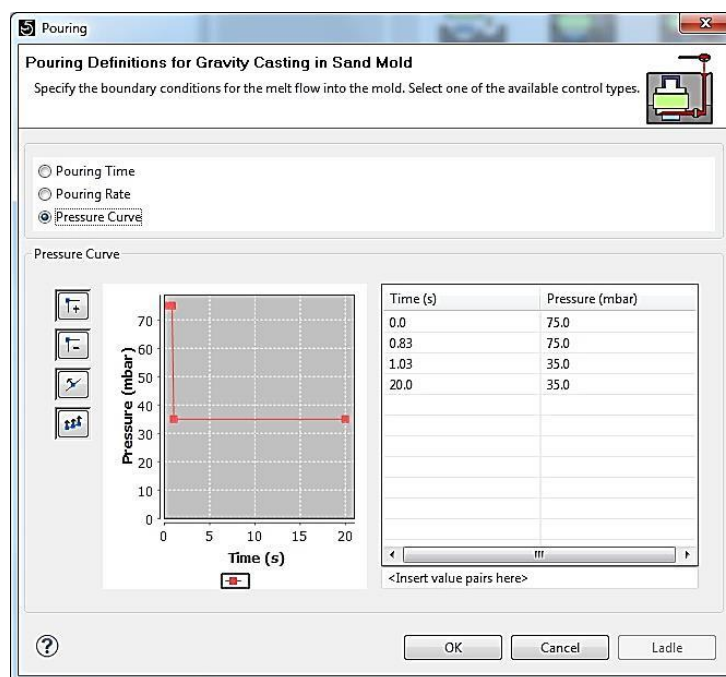


Figura 11b - Representação da curva de pressão final da referência 3393.

Tabela 2b - Medidas dos diferentes lados do trapézio.

a [mm]	b [mm]	h [mm]	A [cm ²]
6	2,9	6,7	0,298
7	4,0	6,5	0,357
8	5,0	6,6	0,427
9	5,8	6,9	0,511
10	6,6	7,3	0,607
11	7,4	7,9	0,725
12	8,0	8,7	0,869
13	8,6	9,6	1,035
14	9,1	10,7	1,234
15	9,4	12,1	1,477
16	9,7	13,7	1,759
17	9,7	15,8	2,110
18	9,6	18,2	2,511
19	9,2	21,3	2,999
20	8,3	25,3	3,582
22	9,4	27,2	4,276
24	10,2	29,9	5,112
26	10,6	33,3	6,098
28	10,05	37,8	7,285
30	9,9	43,6	8,690
32	11,2	45,0	8,720

Em que :

a - dimensão maior,
b - dimensão menor,
h - altura do canal,
 θ - ângulo de saída, $\theta \approx 13^\circ$.

Material: Poliuretano

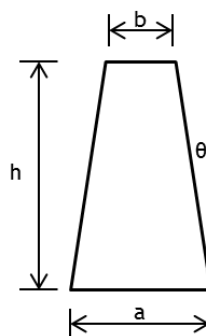


Figura 12b - Representação esquemática da seção do canal de distribuição.

Dados	Relatórios	Ajuda	Mudar Utilizador	Sair
C. Química	Tratamentos	Prop. Mec.	HB Matriz	Temperatura
Fusão	Holding's	Moldação	Aerías	Macharia
Acabamento (Tradicional)	Protótipo	Panther	Tiger	Leopard
14	15	ASEA 2	MK5	230P
15	16	ASEA 2	MK5	230P
16	17	ASEA 2	MK5	230P
17	18	ASEA 2	MK5	230P
18	19	ASEA 2	MK5	230P
19	20	ASEA 2	MK5	230P
20	21	ASEA 2	MK5	230P
21	22	ASEA 2	MK5	230P
22	23	ASEA 2	MK5	230P
23	24	ASEA 2	MK5	230P
24	25	ASEA 2	MK5	230P
25	26	ASEA 2	MK5	230P
26	27	ASEA 2	MK5	230P
27	28	ASEA 2	MK5	230P
28	29	ASEA 2	MK5	230P
29	30	ASEA 2	MK5	230P
30	31	ASEA 2	MK5	230P
31	32	ASEA 2	MK5	230P
32	33	ASEA 2	MK5	230P
33	34	ASEA 2	MK5	230P
34	35	ASEA 2	MK5	230P
35	36	ASEA 2	MK5	230P
36	37	ASEA 2	MK5	230P
37	38	ASEA 2	MK5	230P
38	39	ASEA 2	MK5	230P
39	40	ASEA 2	MK5	230P
40	41	ASEA 2	MK5	230P
41	42	ASEA 2	MK5	230P
42	43	ASEA 2	MK5	230P
43	44	ASEA 2	MK5	230P
44	45	ASEA 2	MK5	230P
45	46	ASEA 2	MK5	230P
46	47	ASEA 2	MK5	230P
47	48	ASEA 2	MK5	230P
48	49	ASEA 2	MK5	230P
49	50	ASEA 2	MK5	230P
50	51	ASEA 2	MK5	230P
51	52	ASEA 2	MK5	230P
52	53	ASEA 2	MK5	230P
53	54	ASEA 2	MK5	230P
54	55	ASEA 2	MK5	230P
55	56	ASEA 2	MK5	230P
56	57	ASEA 2	MK5	230P
57	58	ASEA 2	MK5	230P
58	59	ASEA 2	MK5	230P
59	60	ASEA 2	MK5	230P
60	61	ASEA 2	MK5	230P
61	62	ASEA 2	MK5	230P
62	63	ASEA 2	MK5	230P
63	64	ASEA 2	MK5	230P
64	65	ASEA 2	MK5	230P
65	66	ASEA 2	MK5	230P
66	67	ASEA 2	MK5	230P
67	68	ASEA 2	MK5	230P
68	69	ASEA 2	MK5	230P
69	70	ASEA 2	MK5	230P
70	71	ASEA 2	MK5	230P
71	72	ASEA 2	MK5	230P
72	73	ASEA 2	MK5	230P
73	74	ASEA 2	MK5	230P
74	75	ASEA 2	MK5	230P
75	76	ASEA 2	MK5	230P
76	77	ASEA 2	MK5	230P
77	78	ASEA 2	MK5	230P
78	79	ASEA 2	MK5	230P
79	80	ASEA 2	MK5	230P
80	81	ASEA 2	MK5	230P
81	82	ASEA 2	MK5	230P
82	83	ASEA 2	MK5	230P
83	84	ASEA 2	MK5	230P
84	85	ASEA 2	MK5	230P
85	86	ASEA 2	MK5	230P
86	87	ASEA 2	MK5	230P
87	88	ASEA 2	MK5	230P
88	89	ASEA 2	MK5	230P
89	90	ASEA 2	MK5	230P
90	91	ASEA 2	MK5	230P
91	92	ASEA 2	MK5	230P
92	93	ASEA 2	MK5	230P
93	94	ASEA 2	MK5	230P
94	95	ASEA 2	MK5	230P
95	96	ASEA 2	MK5	230P
96	97	ASEA 2	MK5	230P
97	98	ASEA 2	MK5	230P
98	99	ASEA 2	MK5	230P
99	100	ASEA 2	MK5	230P

Figura 13b - Janela do Datapro com a Tabela 1, onde se encontram as diferentes composições químicas da referência 3391 (a destacado encontra-se a composição química considerada na simulação 7).

Dados	Relatórios	Ajuda	Mudar Utilizador	Sair
C. Química	Tratamentos	Prop. Mec.	HB Matriz	Temperatura
Fusão	Holding's	Moldação	Aerías	Macharia
Acabamento (Tradicional)	Protótipo	Panther	Tiger	Leopard
14	15	ASEA 2	MK5	230P
15	16	ASEA 2	MK5	230P
16	17	ASEA 2	MK5	230P
17	18	ASEA 2	MK5	230P
18	19	ASEA 2	MK5	230P
19	20	ASEA 2	MK5	230P
20	21	ASEA 2	MK5	230P
21	22	ASEA 2	MK5	230P
22	23	ASEA 2	MK5	230P
23	24	ASEA 2	MK5	230P
24	25	ASEA 2	MK5	230P
25	26	ASEA 2	MK5	230P
26	27	ASEA 2	MK5	230P
27	28	ASEA 2	MK5	230P
28	29	ASEA 2	MK5	230P
29	30	ASEA 2	MK5	230P
30	31	ASEA 2	MK5	230P
31	32	ASEA 2	MK5	230P
32	33	ASEA 2	MK5	230P
33	34	ASEA 2	MK5	230P
34	35	ASEA 2	MK5	230P
35	36	ASEA 2	MK5	230P
36	37	ASEA 2	MK5	230P
37	38	ASEA 2	MK5	230P
38	39	ASEA 2	MK5	230P
39	40	ASEA 2	MK5	230P
40	41	ASEA 2	MK5	230P
41	42	ASEA 2	MK5	230P
42	43	ASEA 2	MK5	230P
43	44	ASEA 2	MK5	230P
44	45	ASEA 2	MK5	230P
45	46	ASEA 2	MK5	230P
46	47	ASEA 2	MK5	230P
47	48	ASEA 2	MK5	230P
48	49	ASEA 2	MK5	230P
49	50	ASEA 2	MK5	230P
50	51	ASEA 2	MK5	230P
51	52	ASEA 2	MK5	230P
52	53	ASEA 2	MK5	230P
53	54	ASEA 2	MK5	230P
54	55	ASEA 2	MK5	230P
55	56	ASEA 2	MK5	230P
56	57	ASEA 2	MK5	230P
57	58	ASEA 2	MK5	230P
58	59	ASEA 2	MK5	230P
59	60	ASEA 2	MK5	230P
60	61	ASEA 2	MK5	230P
61	62	ASEA 2	MK5	230P
62	63	ASEA 2	MK5	230P
63	64	ASEA 2	MK5	230P
64	65	ASEA 2	MK5	230P
65	66	ASEA 2	MK5	230P
66	67	ASEA 2	MK5	230P
67	68	ASEA 2	MK5	230P
68	69	ASEA 2	MK5	230P
69	70	ASEA 2	MK5	230P
70	71	ASEA 2	MK5	230P
71	72	ASEA 2	MK5	230P
72	73	ASEA 2	MK5	230P
73	74	ASEA 2	MK5	230P
74	75	ASEA 2	MK5	230P
75	76	ASEA 2	MK5	230P
76	77	ASEA 2	MK5	230P
77	78	ASEA 2	MK5	230P
78	79	ASEA 2	MK5	230P
79	80	ASEA 2	MK5	230P
80	81	ASEA 2	MK5	230P
81	82	ASEA 2	MK5	230P
82	83	ASEA 2	MK5	230P
83	84	ASEA 2	MK5	230P
84	85	ASEA 2	MK5	230P
85	86	ASEA 2	MK5	230P
86	87	ASEA 2	MK5	230P
87	88	ASEA 2	MK5	230P
88	89	ASEA 2	MK5	230P
89	90	ASEA 2	MK5	230P
90	91	ASEA 2	MK5	230P
91	92	ASEA 2	MK5	230P
92	93	ASEA 2	MK5	230P
93	94	ASEA 2	MK5	230P
94	95	ASEA 2	MK5	230P
95	96	ASEA 2	MK5	230P
96	97	ASEA 2	MK5	230P
97	98	ASEA 2	MK5	230P
98	99	ASEA 2	MK5	230P
99	100	ASEA 2	MK5	230P

Figura 14b - Janela do Datapro com a Tabela 2, onde se encontram as diferentes composições químicas da referência 3391 (a destacado encontra-se a composição química considerada na simulação 7).

Simulation Control					
Casting Process					
Material Definitions					
Material	Mat Id	Database/File name	Initial Temperature (°C)	Feeding Effectivity (%)	Iron Composition
Cast Alloy		MAGMA/GIS-500	1400.0	100.0	C (Carbon)
					3.6461 %
					Ce (Cerium)
					0.0045 %
					Cr (Chromium)
					0.0425 %
					Cu (Copper)
					0.2595 %
					Mg (Magnesium)
					0.0382 %
					Mn (Manganese)
					0.3157 %
					Mo (Molybdenum)
					0.0023 %
					N (Nitrogen)
					0.0 ppm
					Ni (Nickel)
					0.0183 %
					P (Phosphorus)
					0.0158 %
					S (Sulfur)
					0.0071 %
					Sb (Antimony)
					0.001 %
					Si (Silicon)
					2.3317 %
					Sn (Tin)
					0.0038 %
Material	Mat Id	Database/File name	Initial Temperature (°C)		
Sand Mold		User/Green_Sand_RUIFEUP	34.0		
Sand Mold	ID 1	User/Green_Sand_RUIFEUP	34.0		

Figura 15b - Janela de seleção da liga a vazar (composição química média) e do material de moldação - Magmasoft.

Filling Simulation	Solidification & Cooling Simulation	Microstructure Simulation
General <input type="checkbox"/> Surface Tension Mold Venting <input checked="" type="checkbox"/> Consider Sand Permeability <input checked="" type="checkbox"/> Consider Vents		

Figura 16b - Interface em que se seleciona a opção "Consider Permeability".

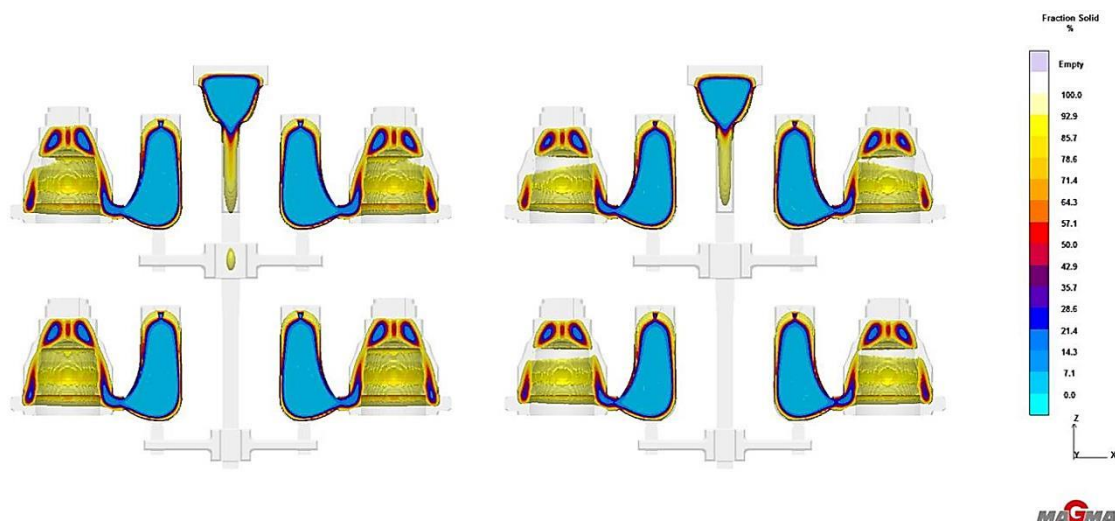


Figura 17b - Imagem do cacho mediante o "output" "Fraction Solid", para 60% (à esquerda) e 65% do volume em estado sólido.

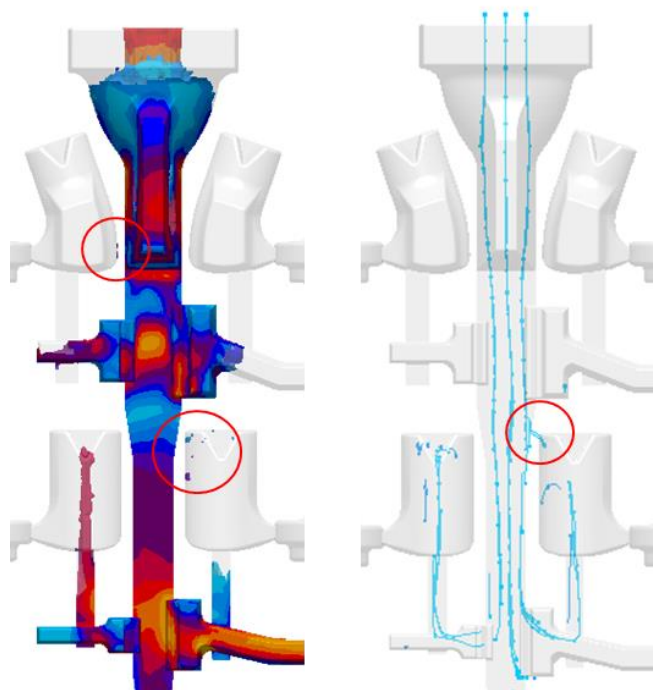


Figura 18b - Representação esquemática da gitagem com as anomalias destacadas, segundo o “Output” “Velocity” (à esquerda) e “Fill Tracer” (à direita).

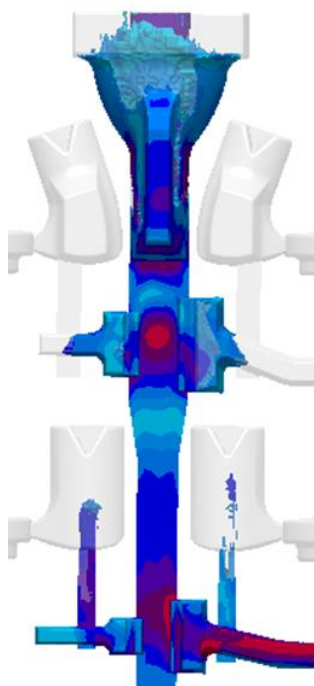


Figura 19b - Representação esquemática da gitagem, segundo o “output” “Velocity”, depois de solucionado o problema.

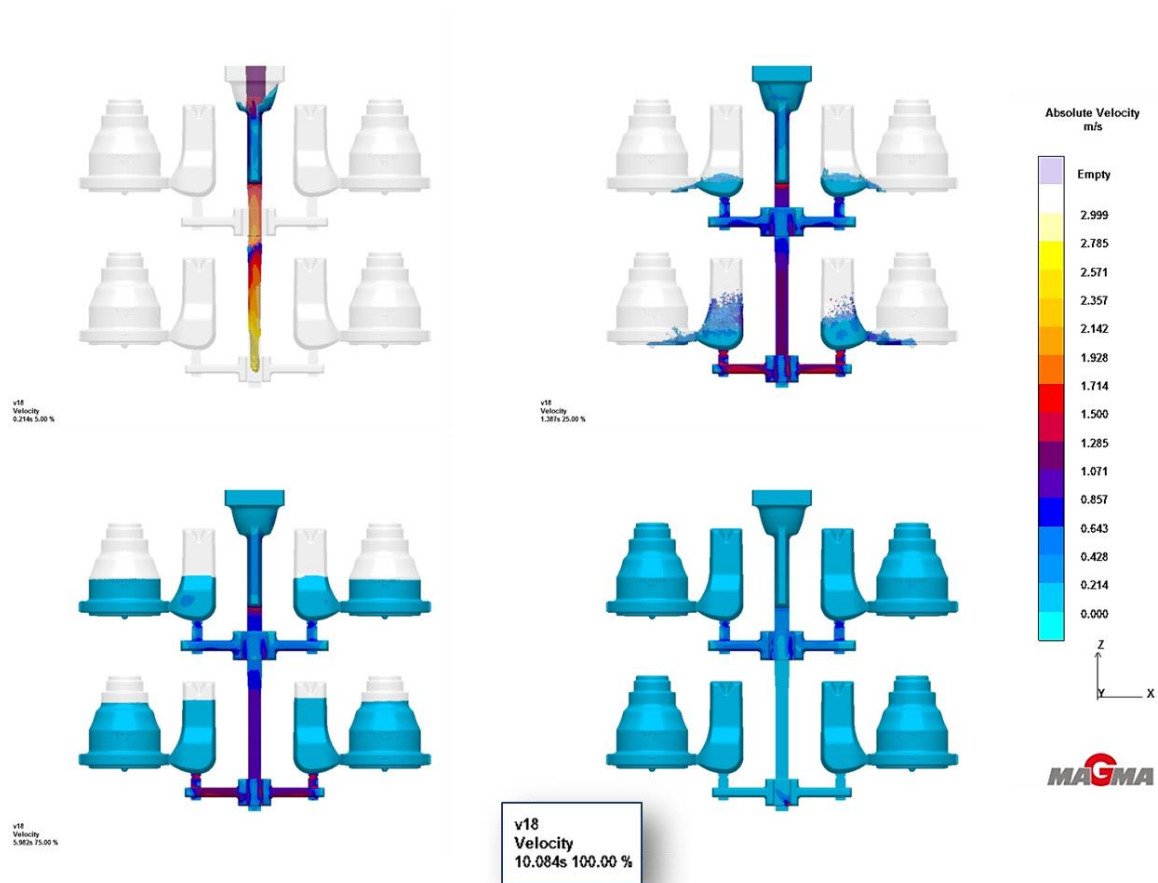


Figura 20b - Representação esquemática do enchimento, segundo o “output” “Velocity”, da simulação 15.

Anexo C

Resultados da análise da sanidade das peças por meio do *Software* de simulação *MagmaSoft*

Referência 3391 – Flange

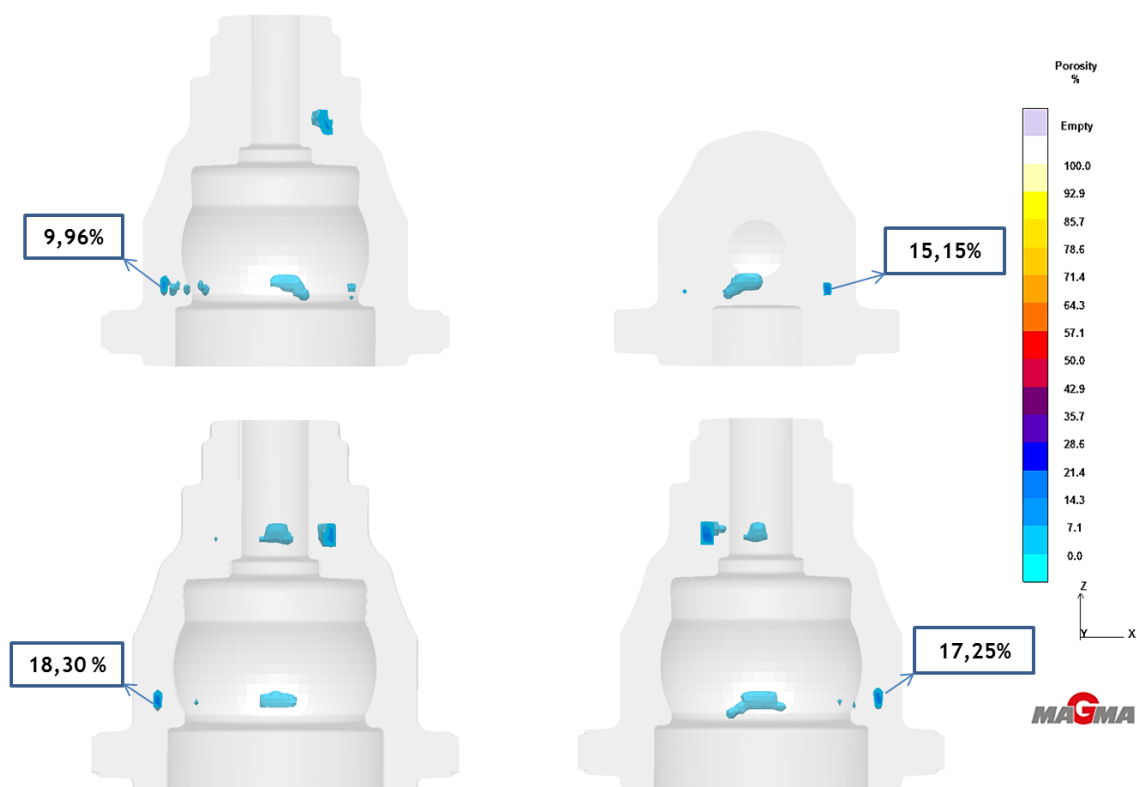


Figura 1c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 1.

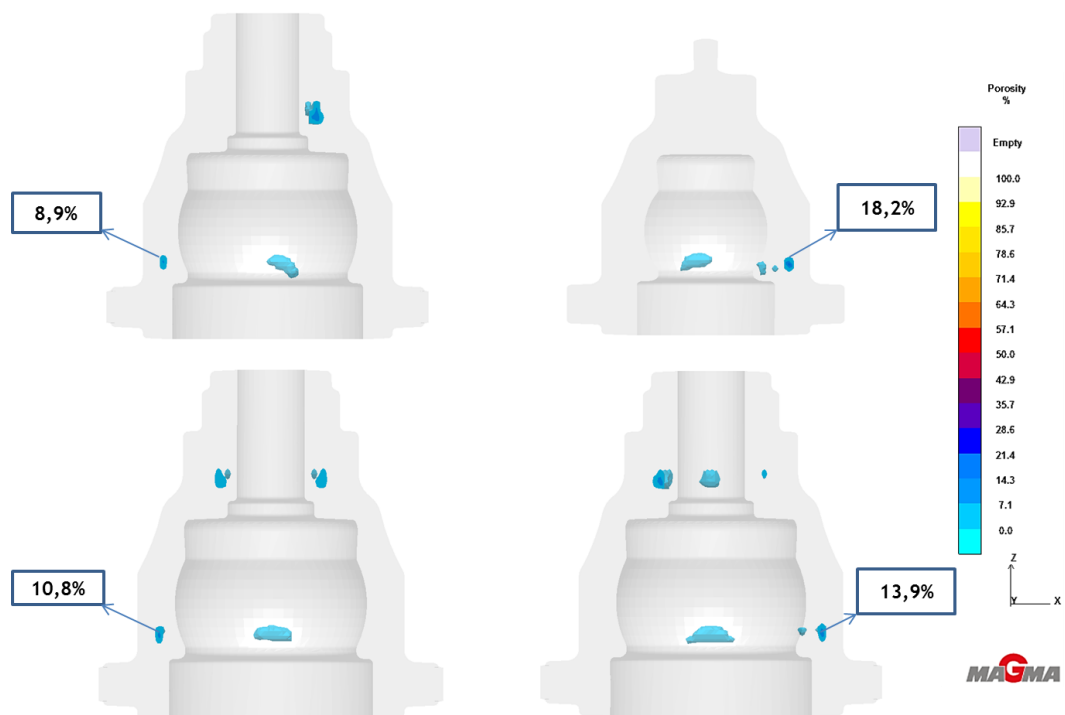


Figura 2c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 2.



Figura 3c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 3.



Figura 4c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 4.

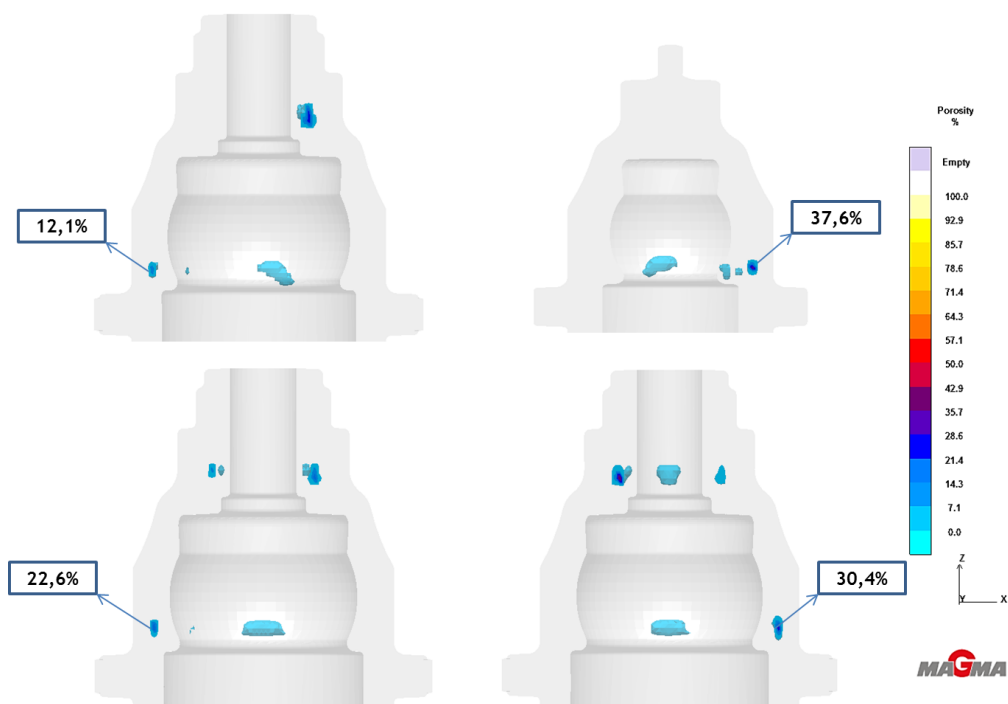


Figura 5c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 5.

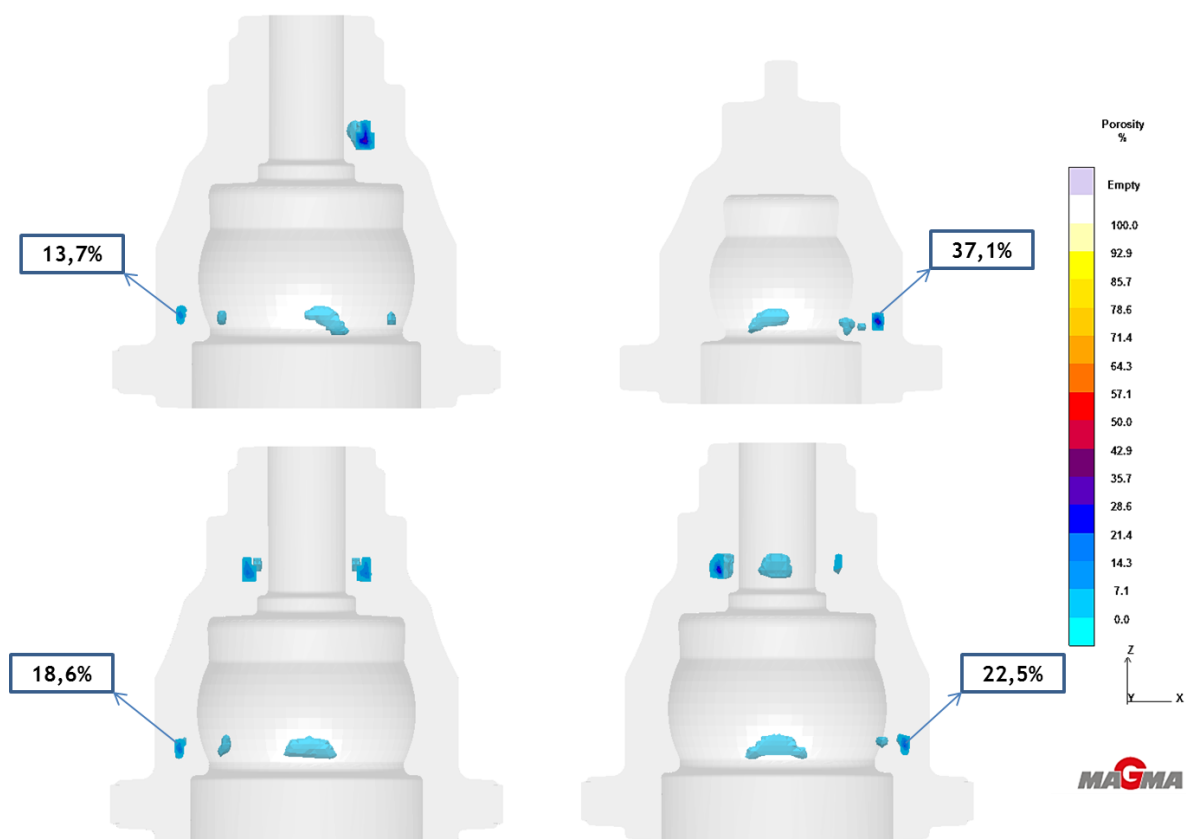


Figura 6c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 6.

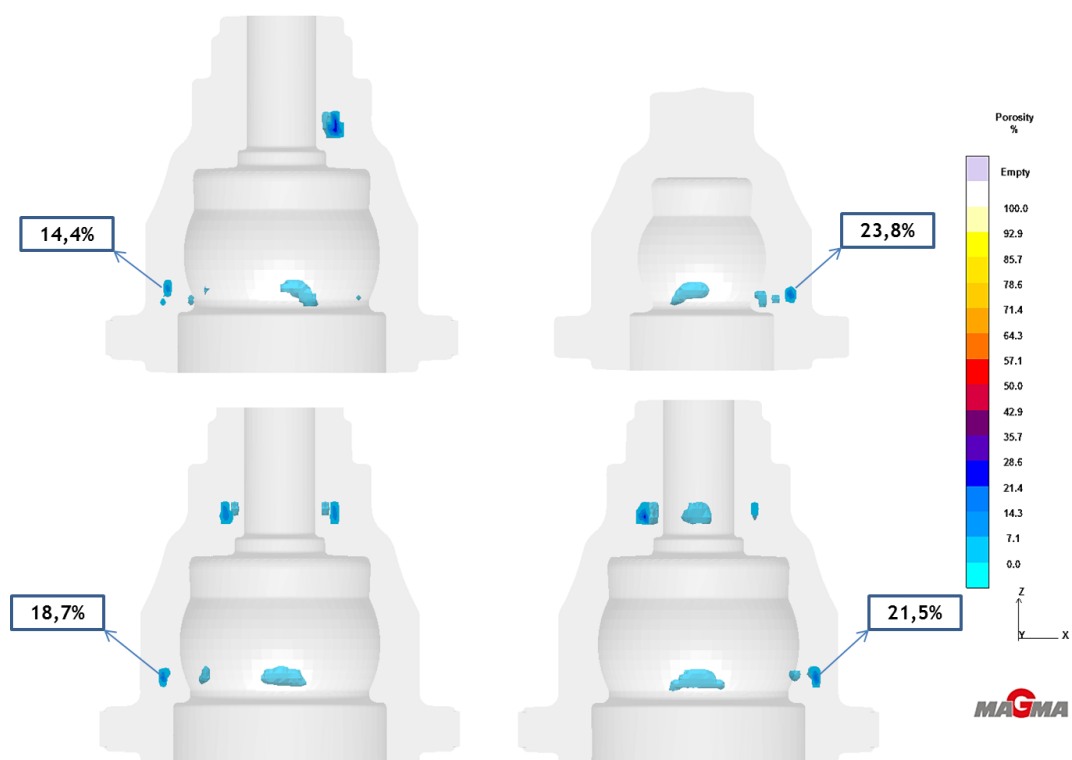


Figura 7c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 7.

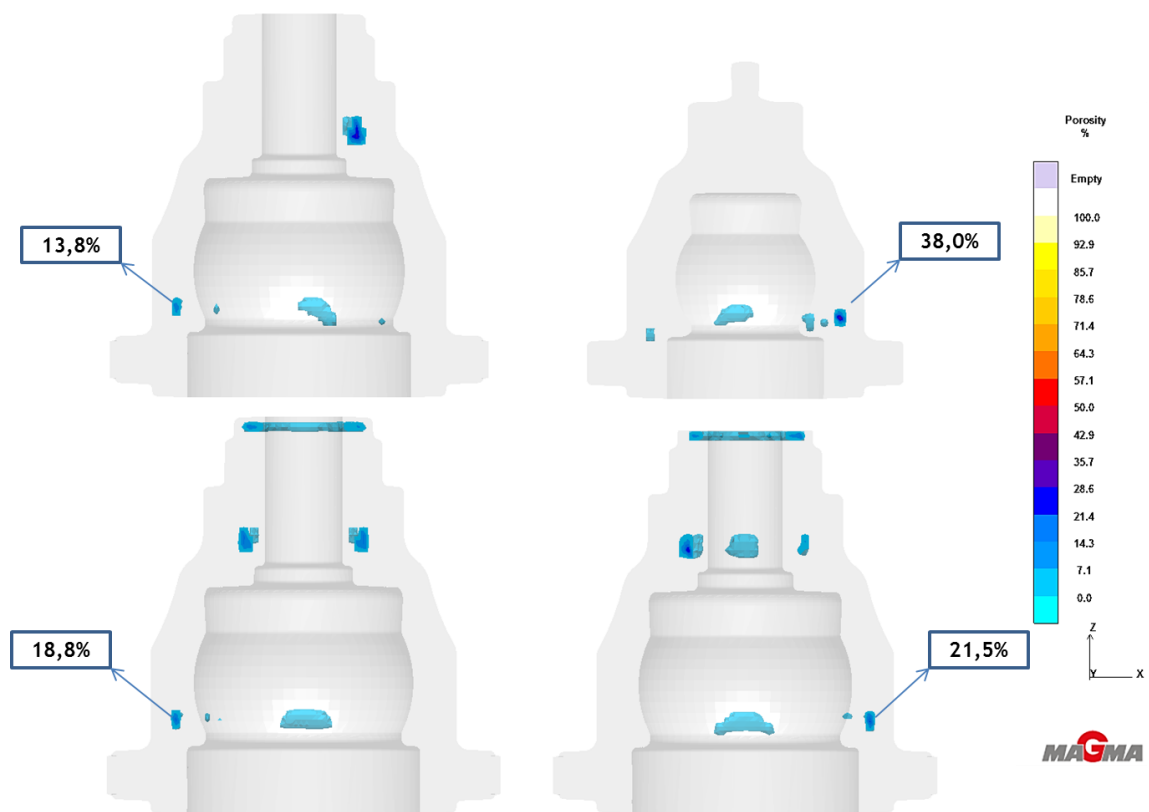


Figura 8c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 8.

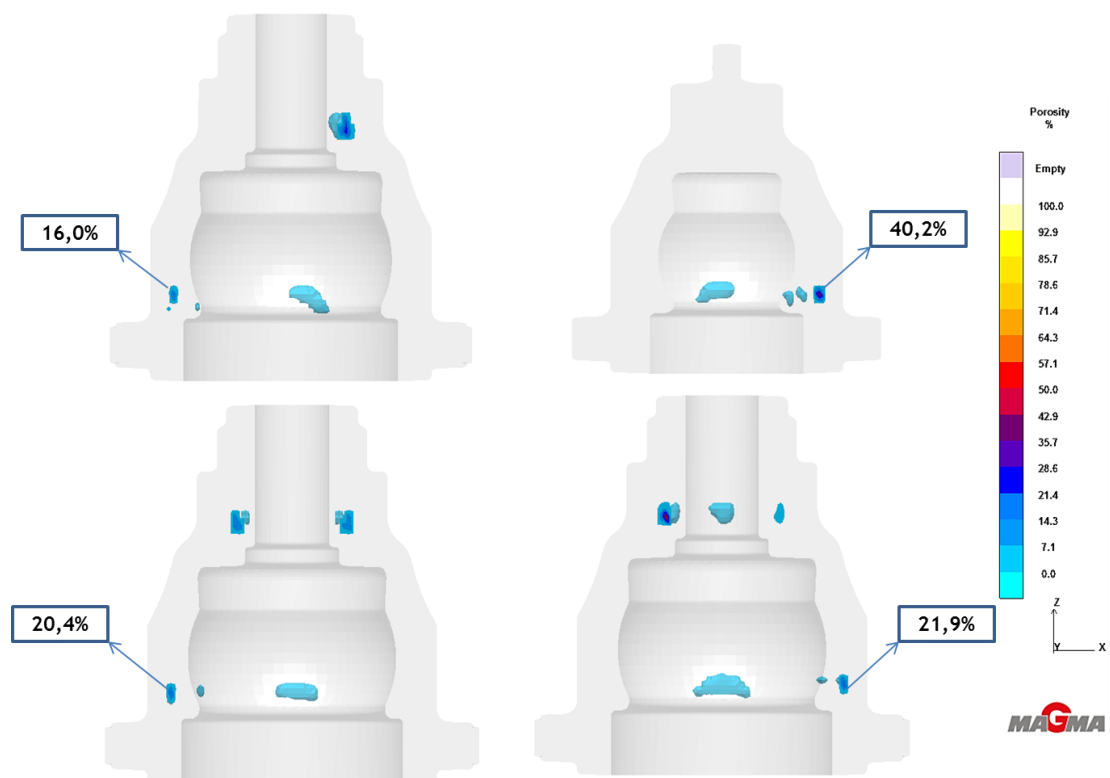


Figura 9c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 9.

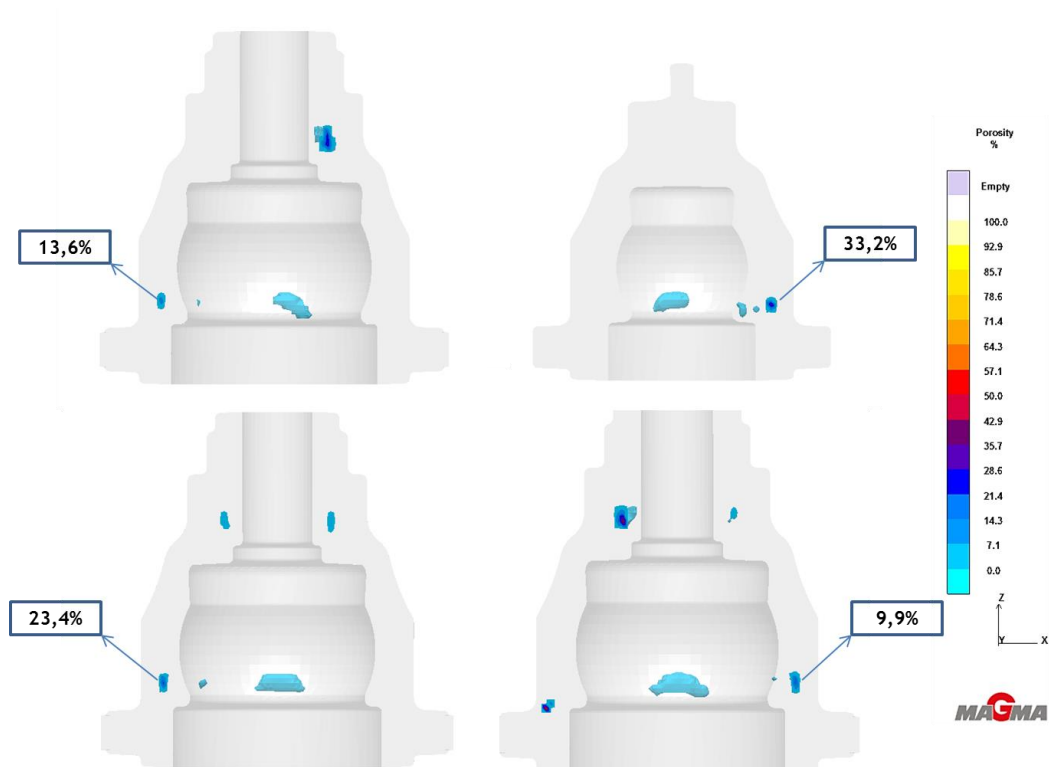


Figura 10c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 10.

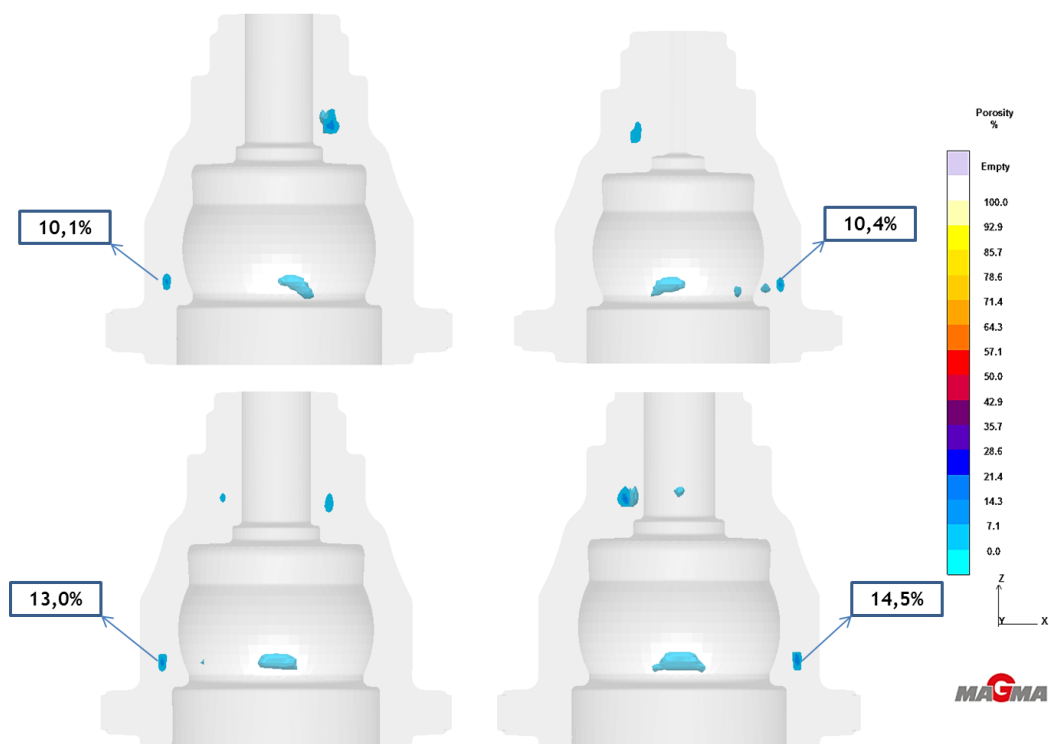


Figura 11c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 11.

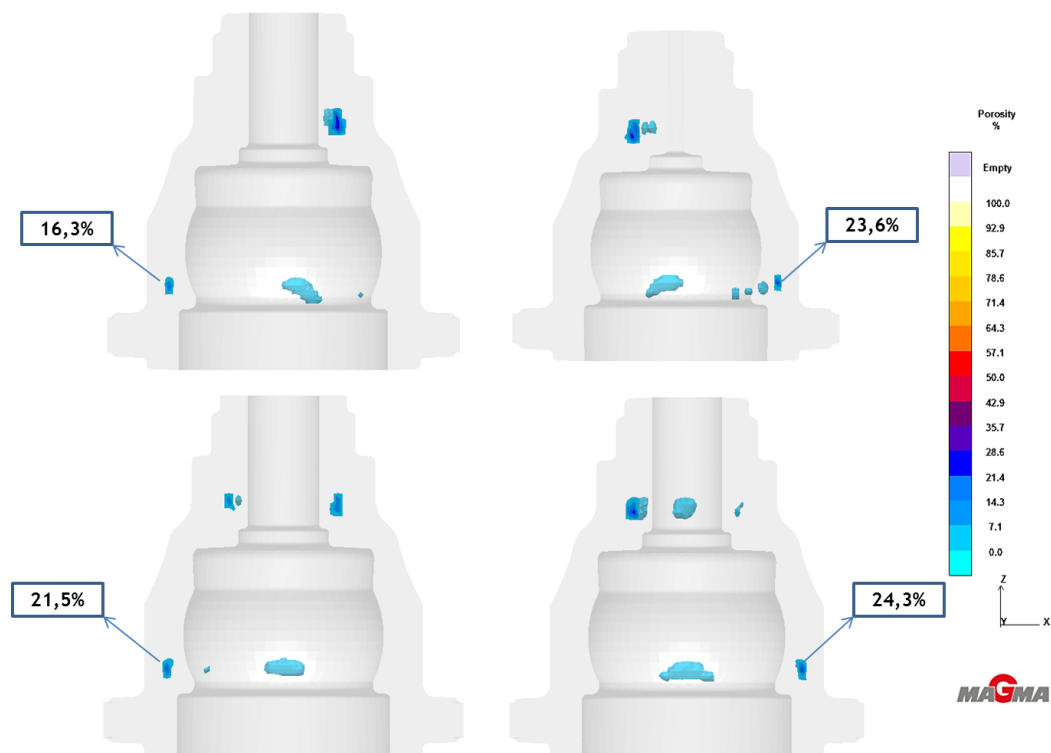


Figura 12c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 12.



Figura 13c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 13.

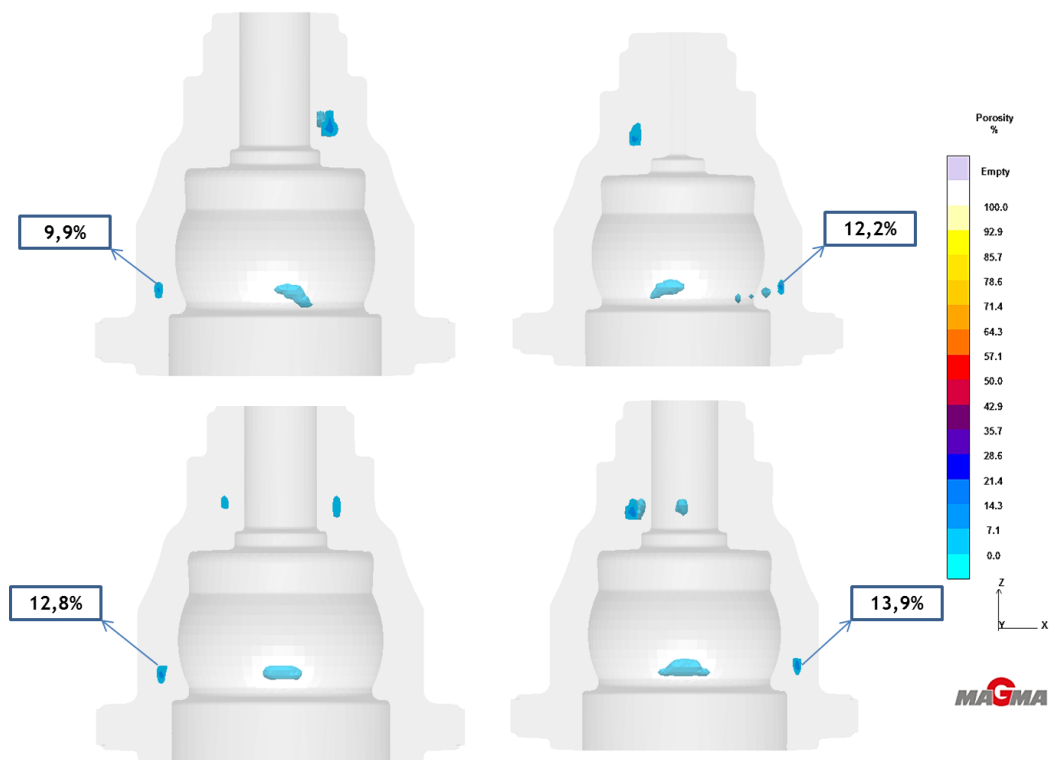


Figura 14c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 14.

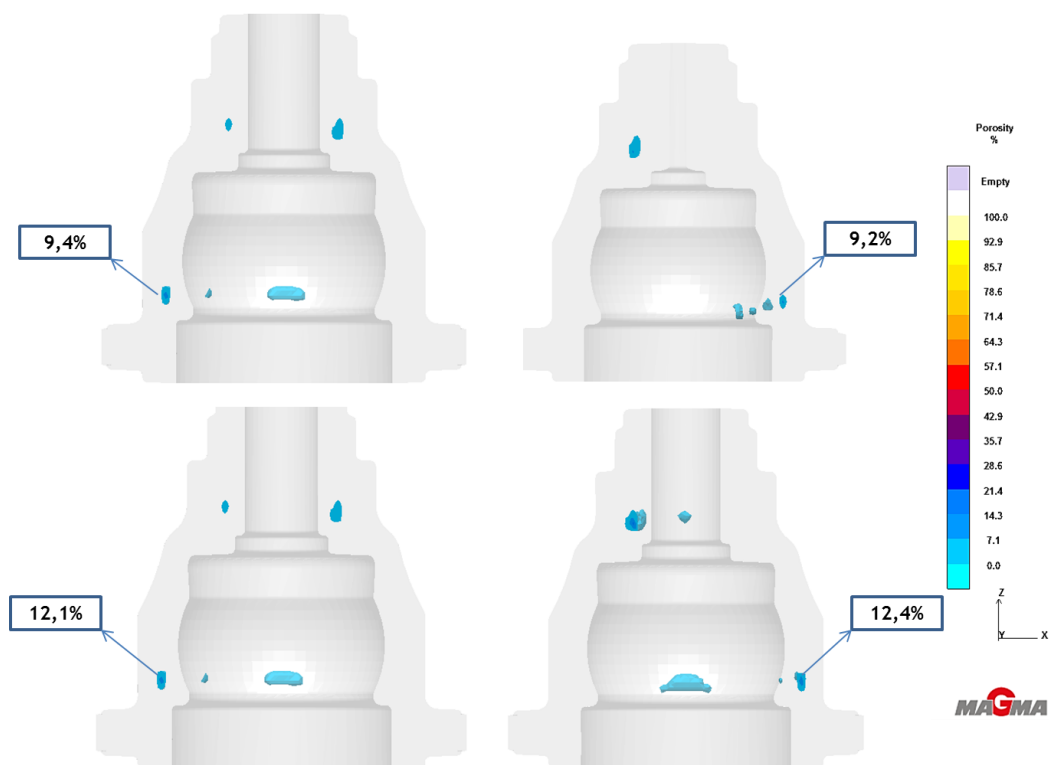


Figura 15c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 15.

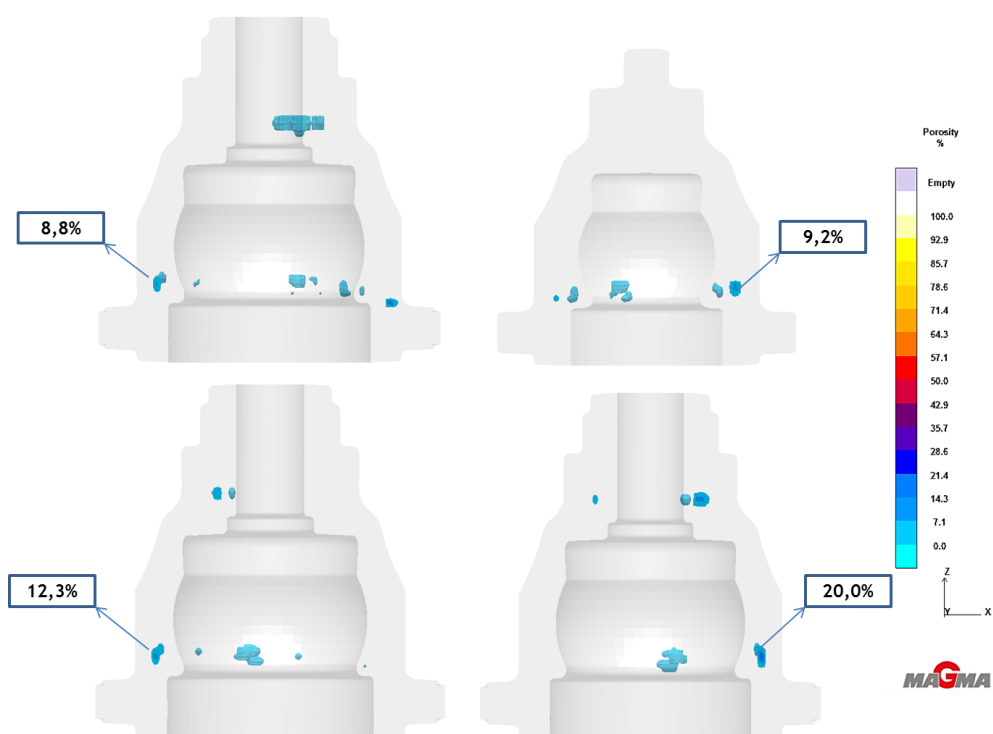


Figura 16c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 16.

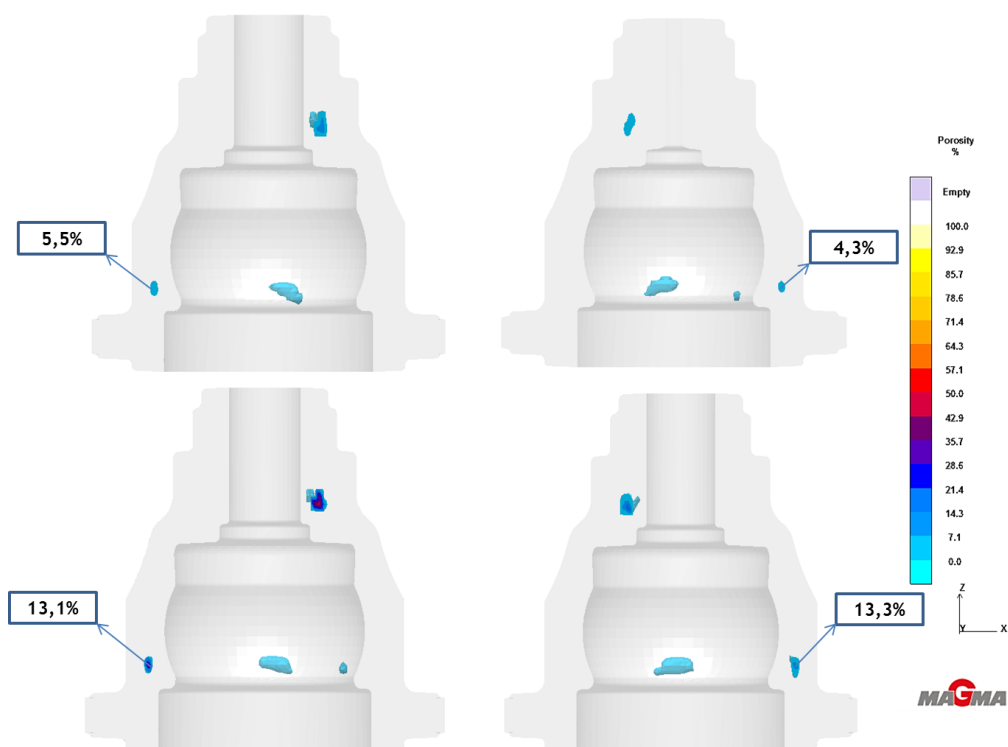


Figura 17c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 17.

Referência 3391 – Canhão

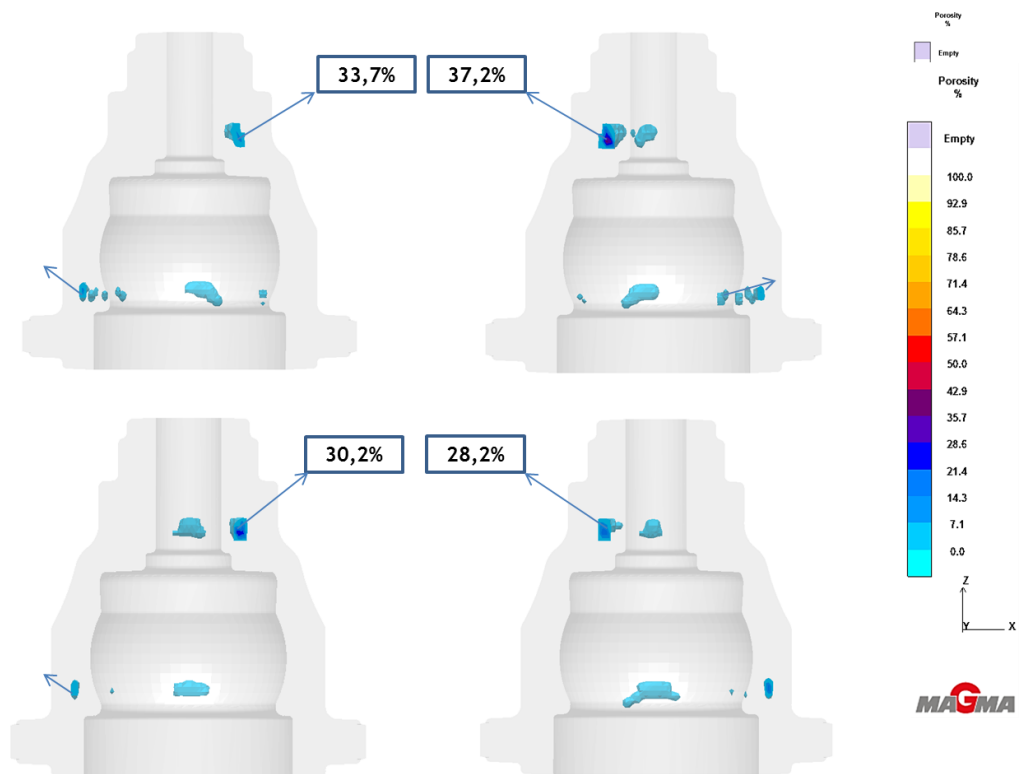


Figura 18c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 1.

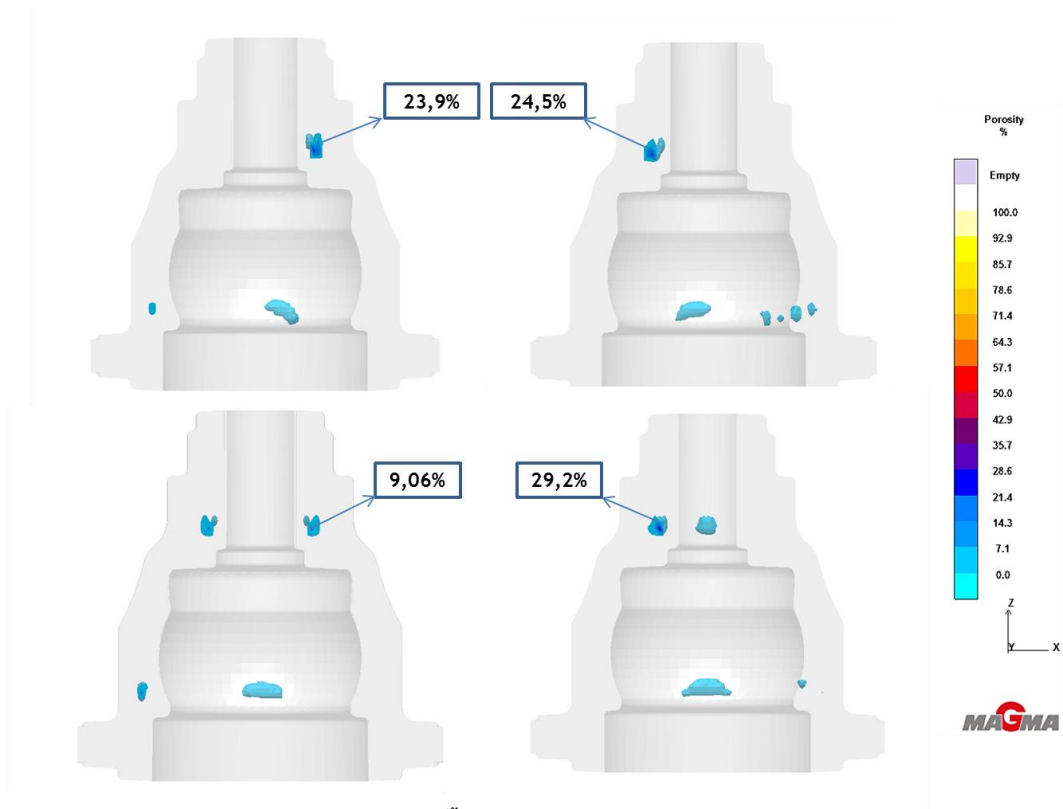


Figura 19c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 2.

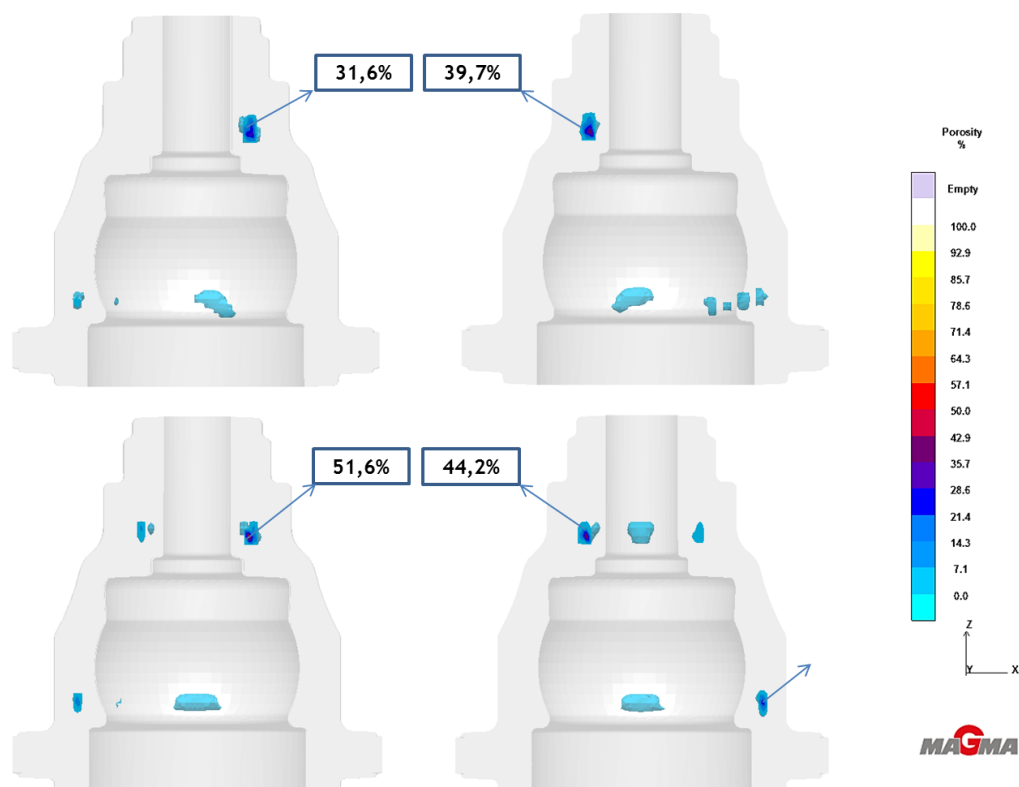


Figura 20c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 5.

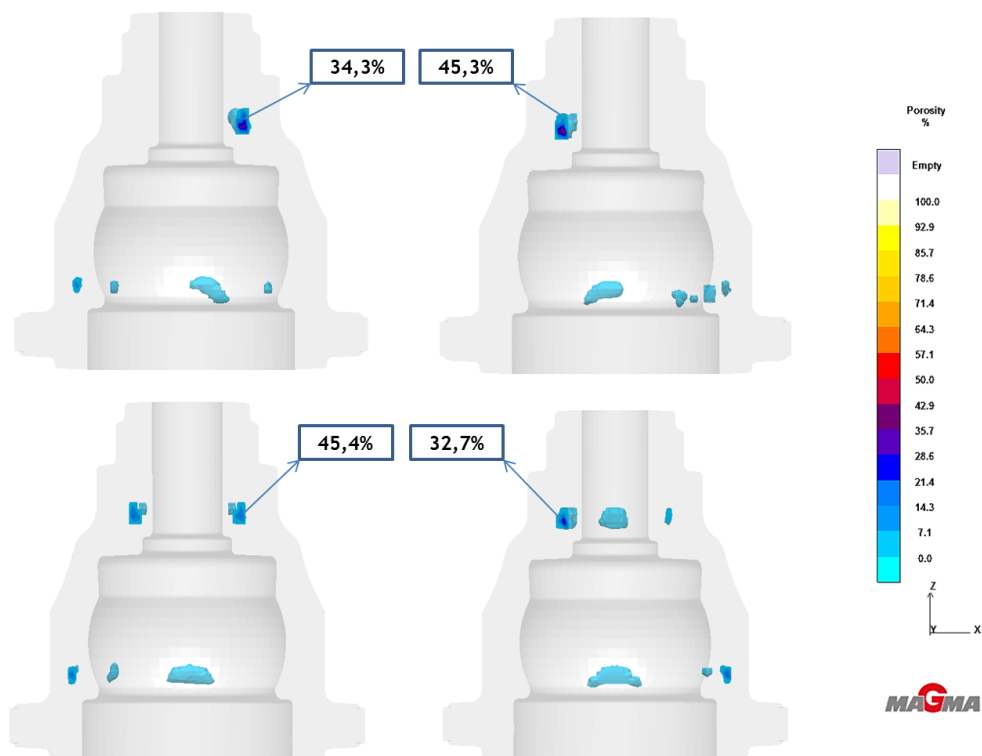


Figura 21c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 6.

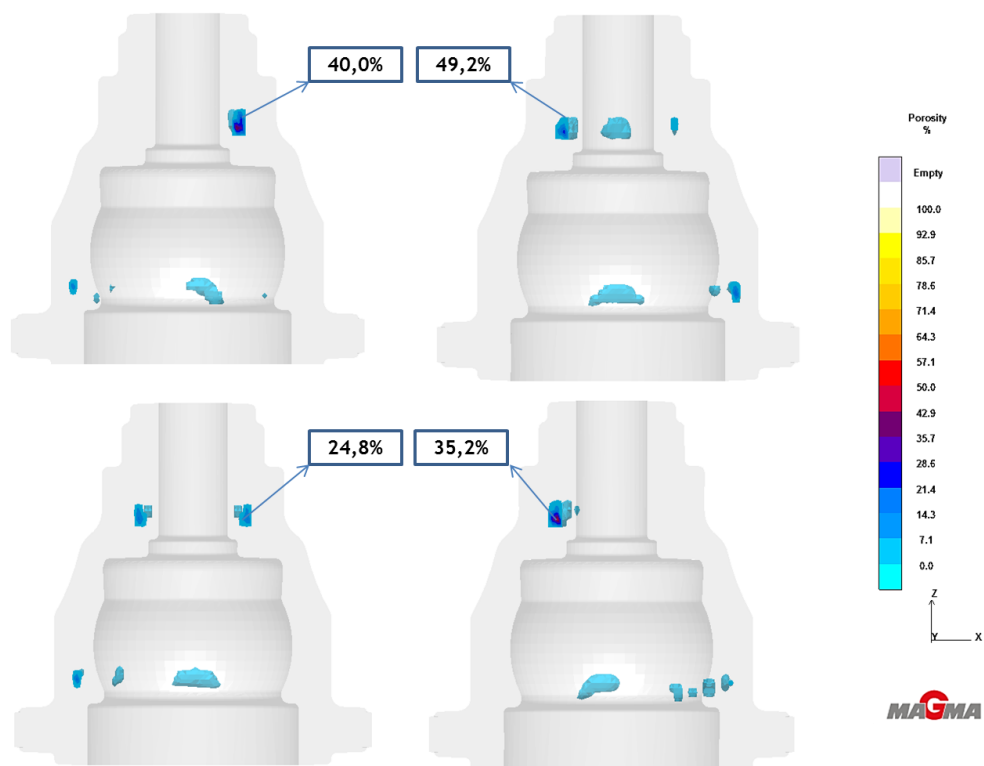


Figura 22c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 7.

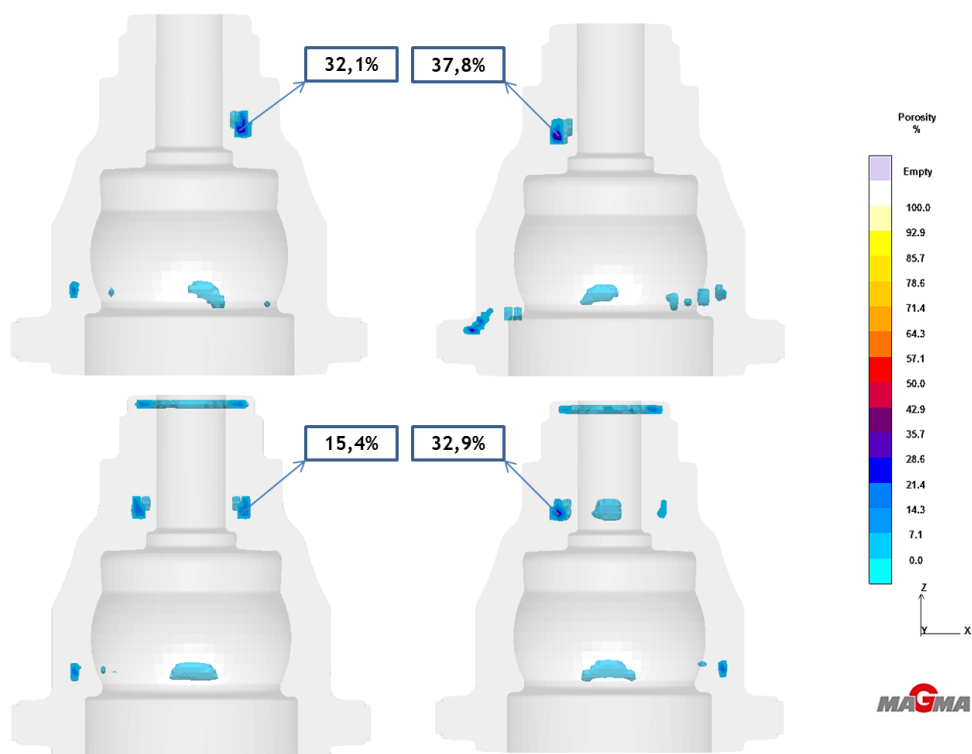


Figura 23c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 8

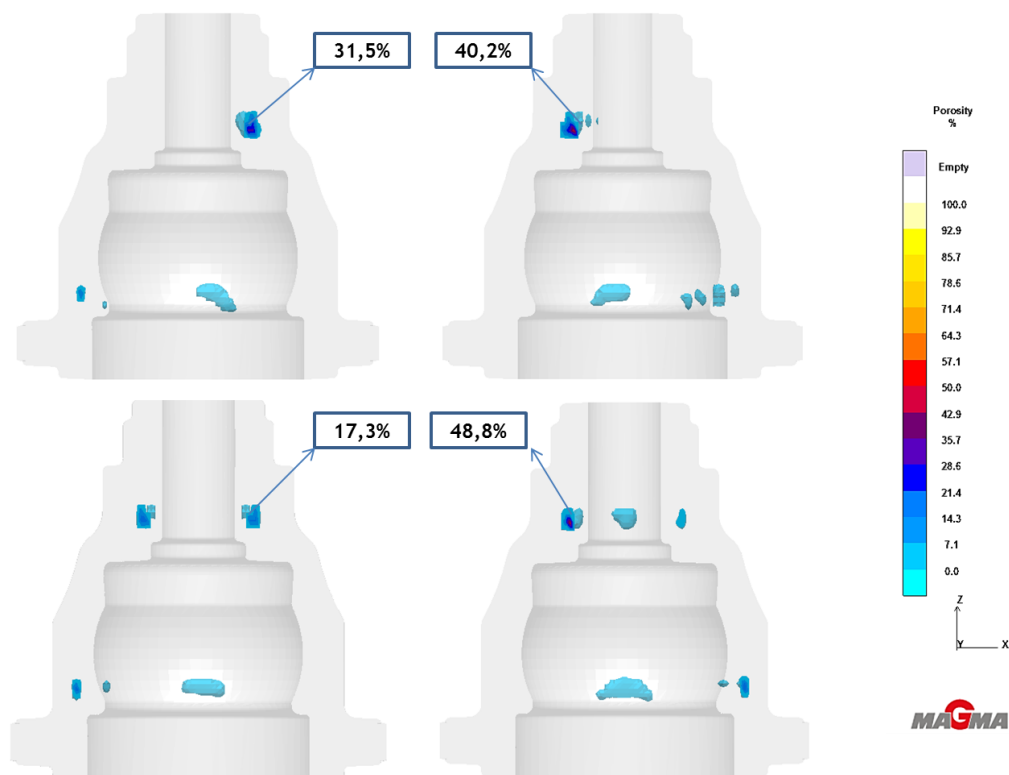


Figura 24c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 9.

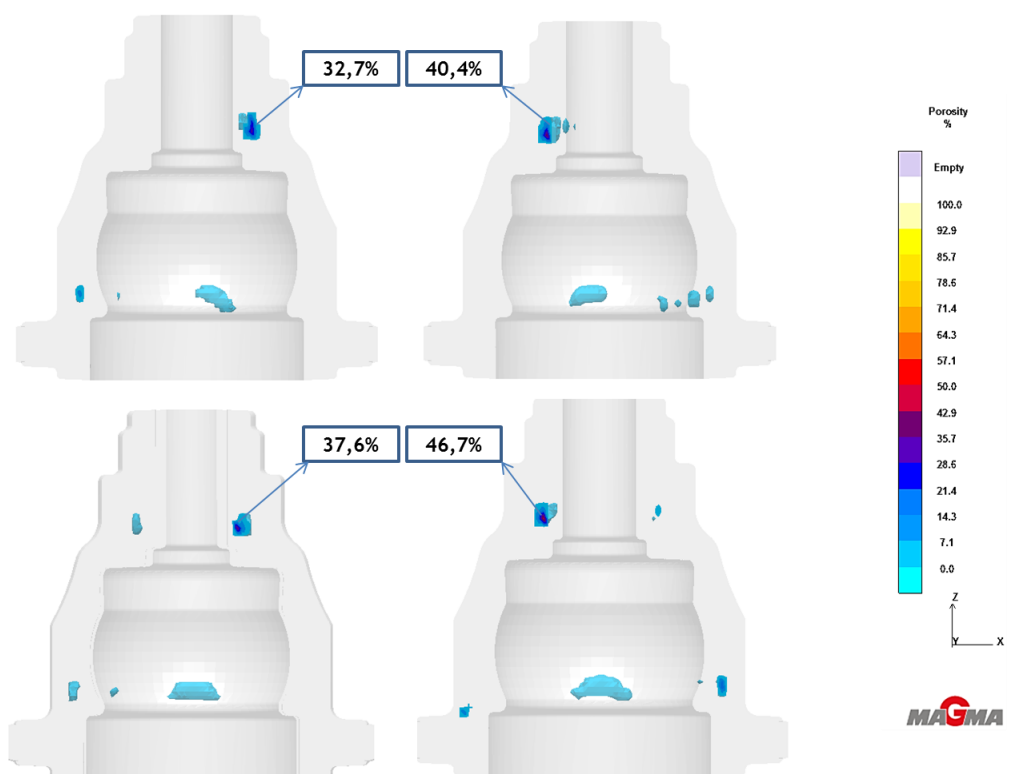


Figura 25c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 10.

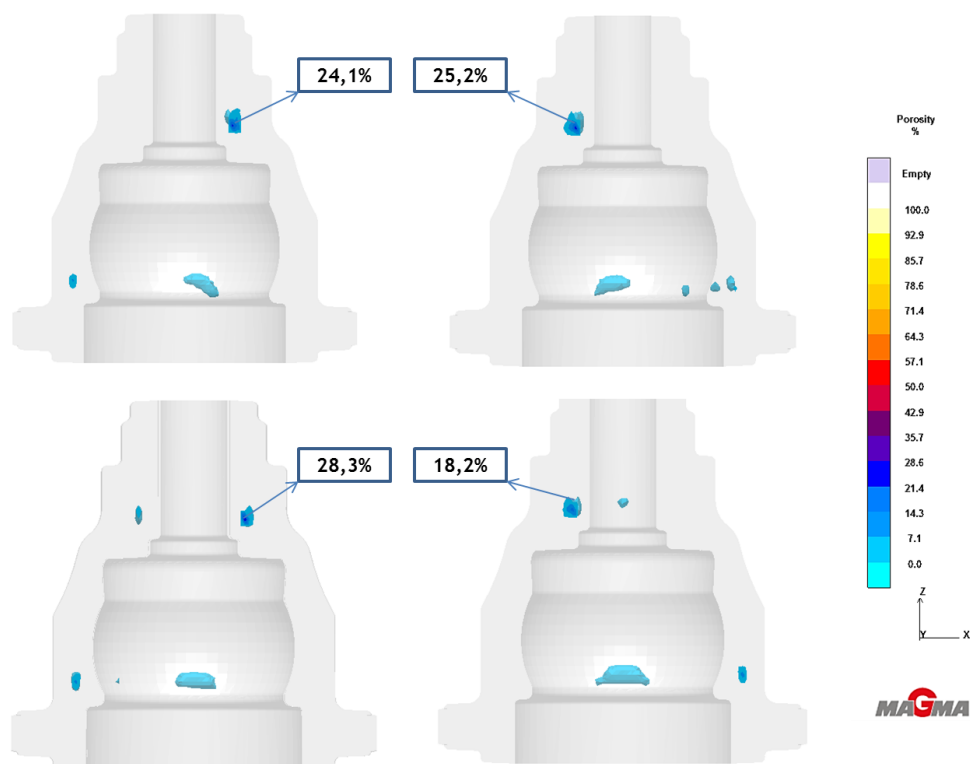


Figura 26c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 11

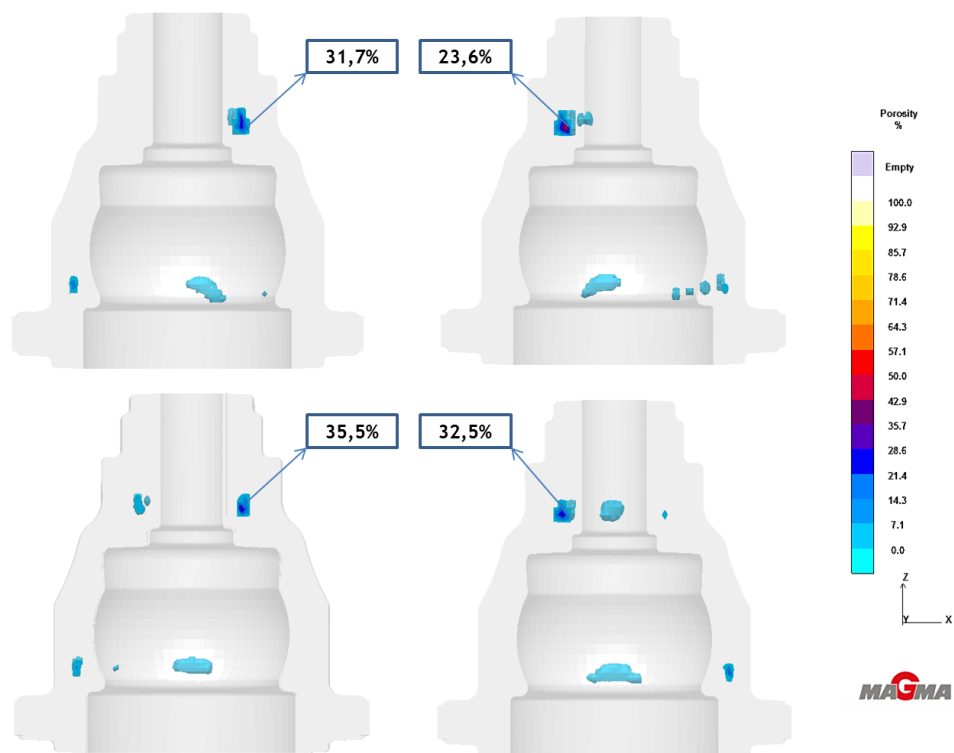


Figura 27c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 12.

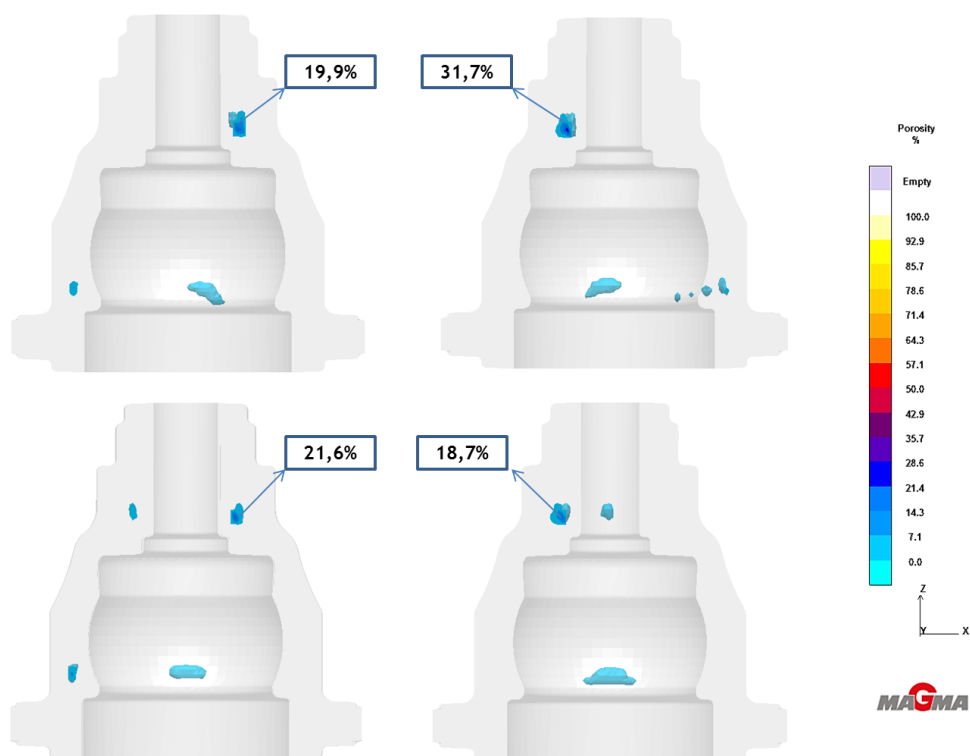


Figura 28c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 14.

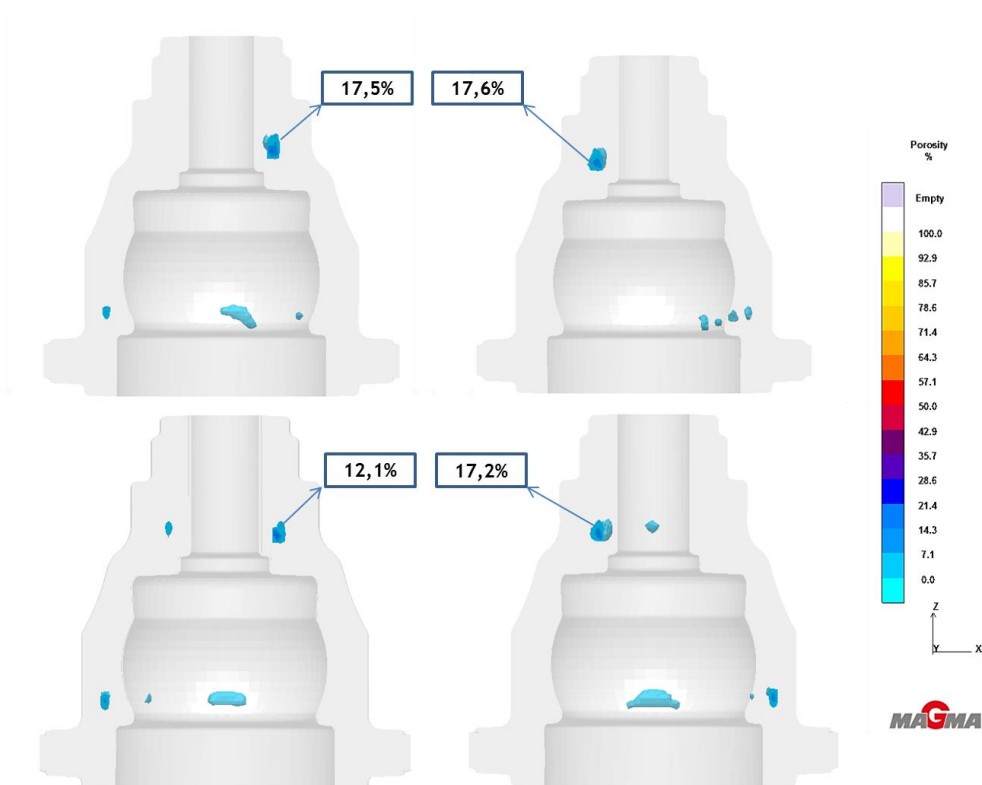


Figura 29c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 15.

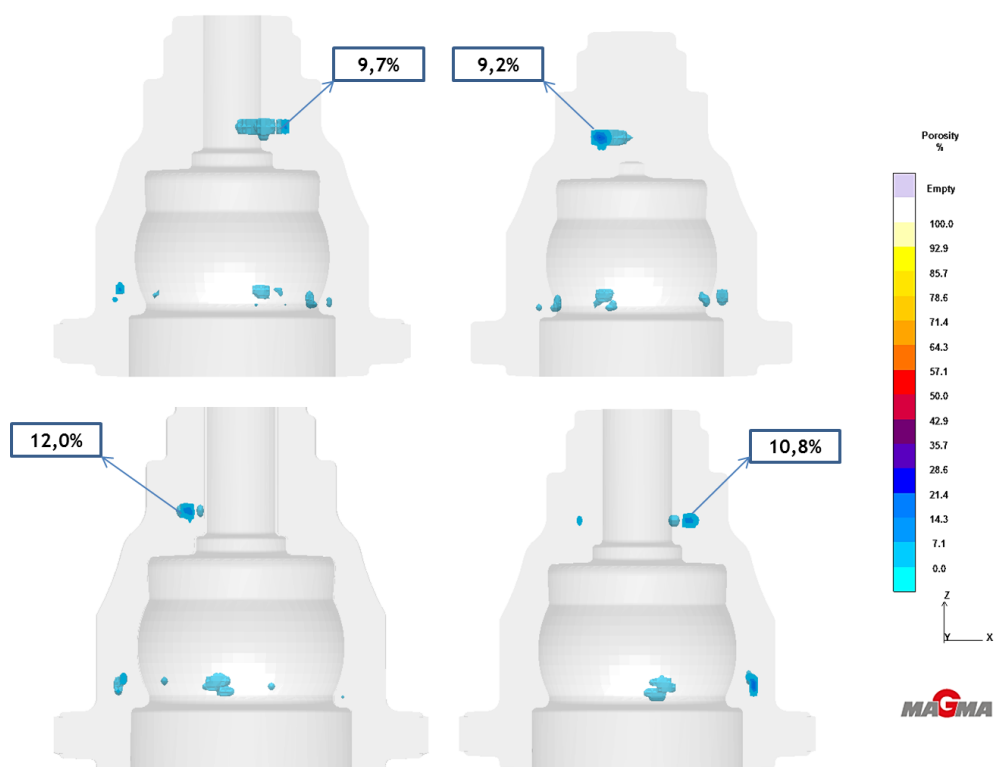


Figura 30c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 16.

Referência 3394

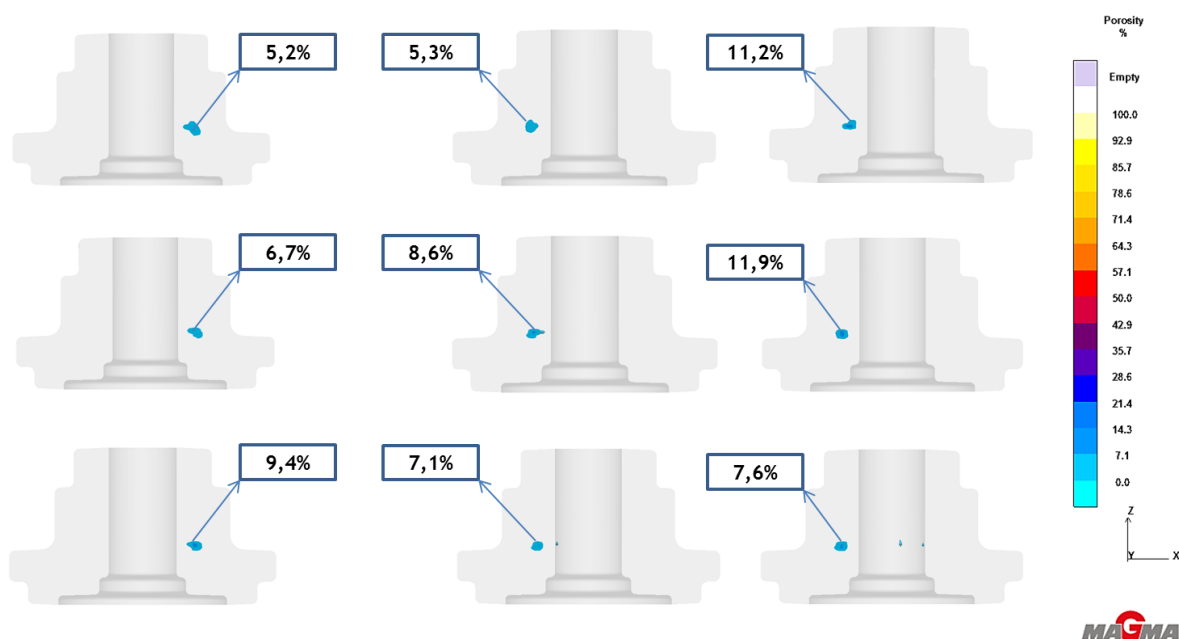


Figura 31c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 18.

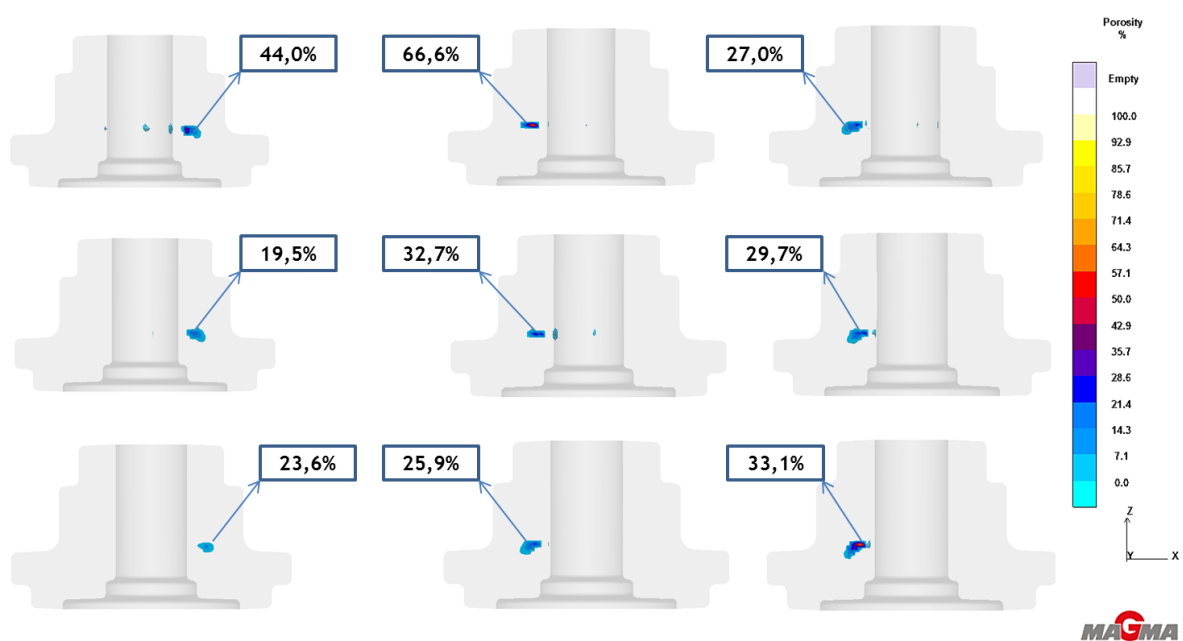


Figura 32c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 19.

Referência 3390

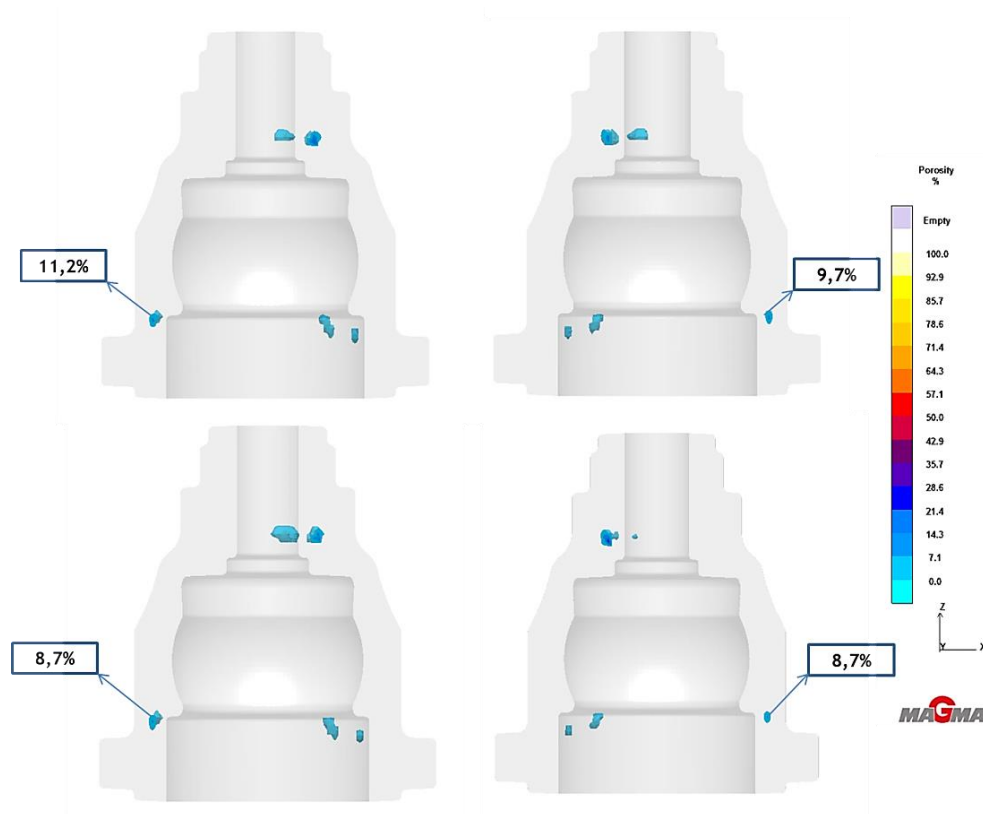


Figura 33c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 20.

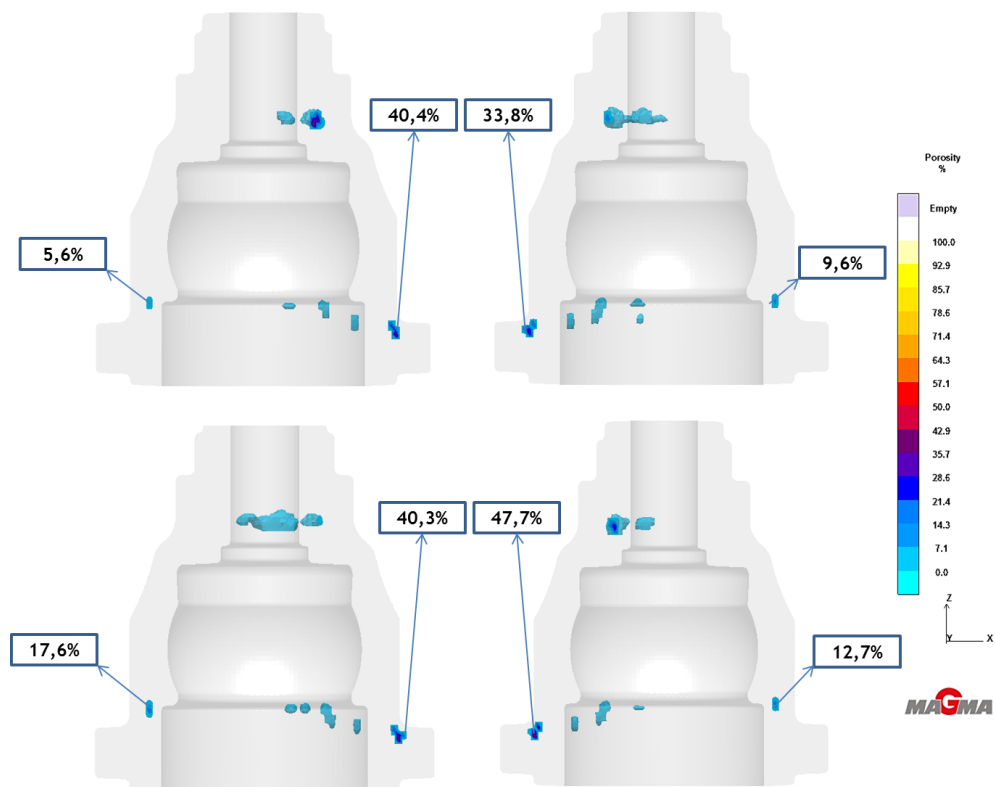


Figura 34c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 21.

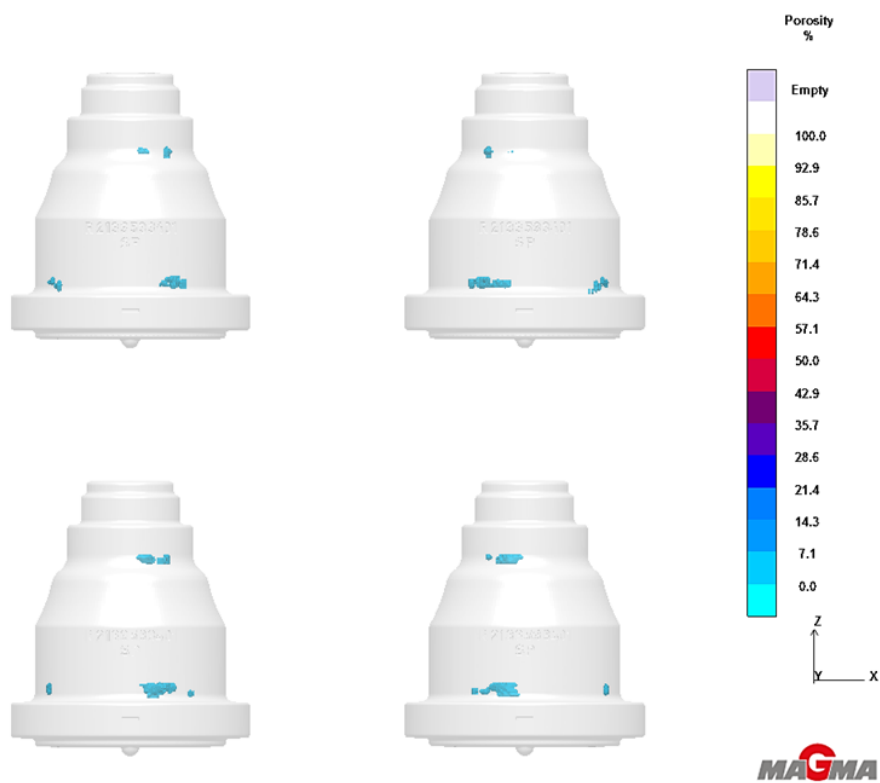


Figura 35c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 20.

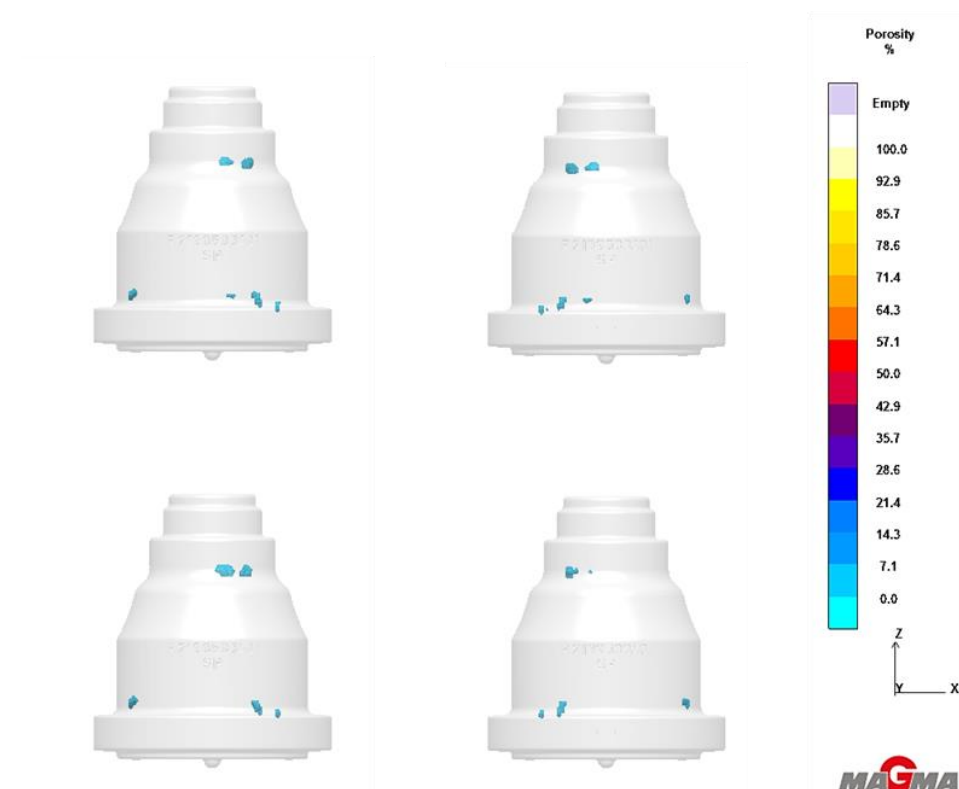


Figura 36c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 22.

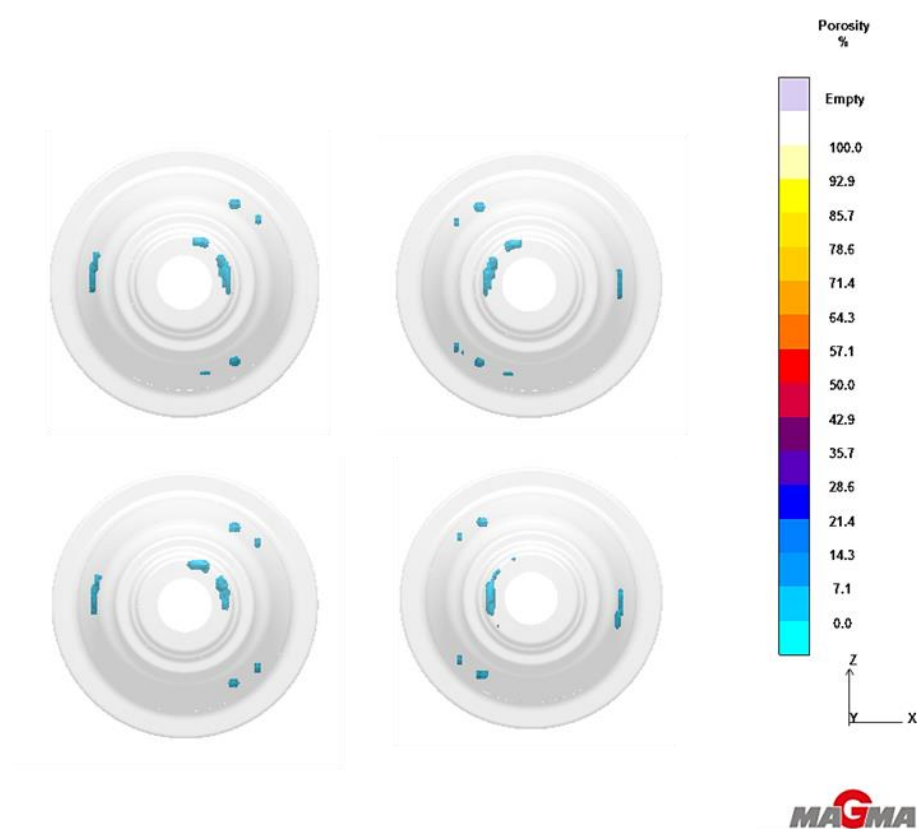


Figura 37c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 20 (vista de cima), das peças do nível superior (em cima) e das peças do nível inferior (em baixo).

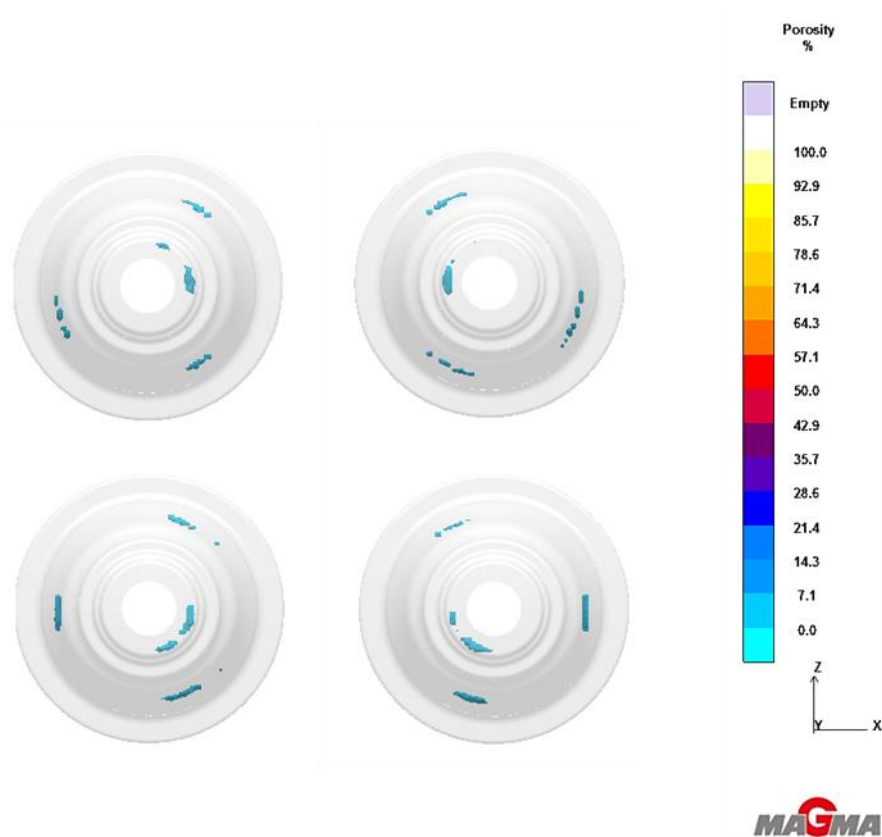


Figura 38c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 22 (vista de cima), das peças do nível superior (em cima) e das peças do nível inferior (em baixo).

Referência 3393

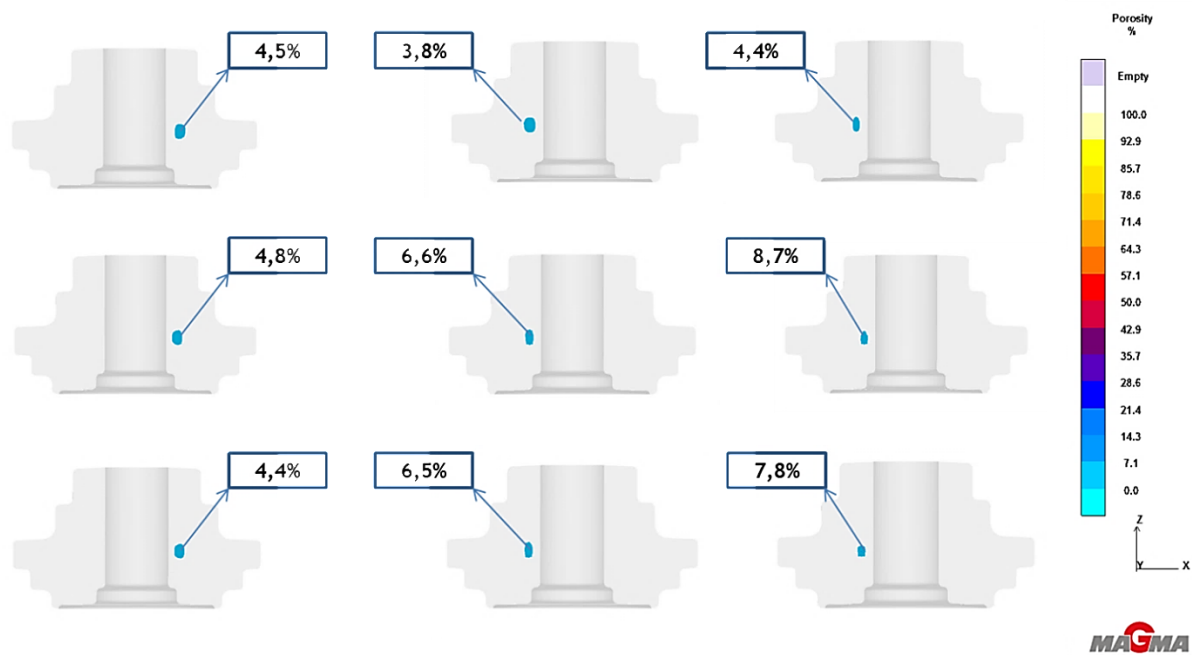


Figura 39c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 23.

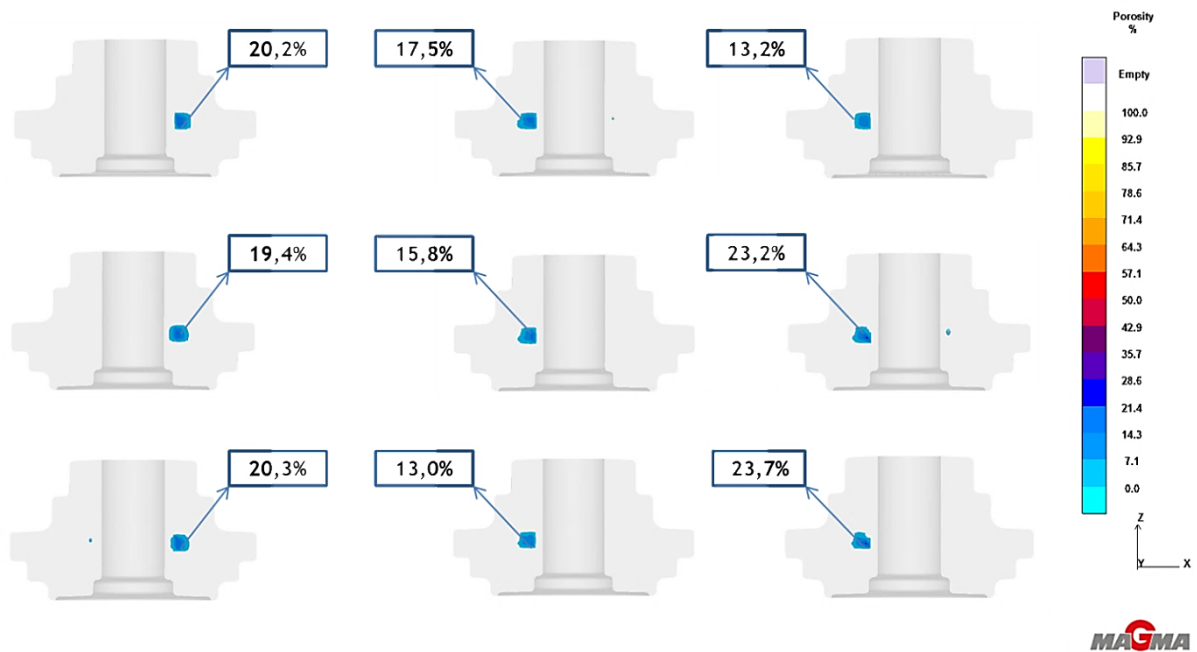


Figura 40c - Representação esquemática do resultado “Porosidade” da simulação 24.

Anexo D

Resultados da análise da sanidade das peças através de ensaio de Raio-X

Referência 3391

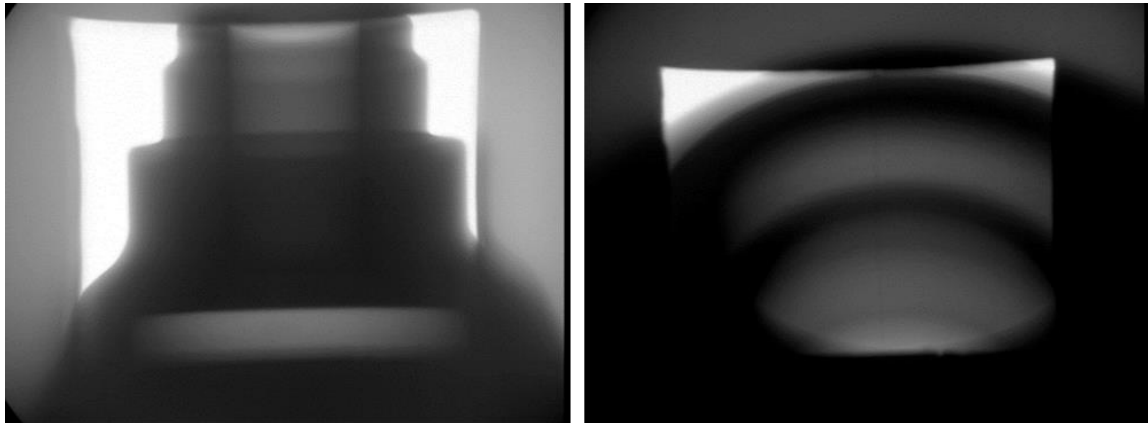


Figura 1d - Imagem de Raio-X retirado à peça 1, nas zonas do canhão e corpo (à esquerda) e flange (à direita).

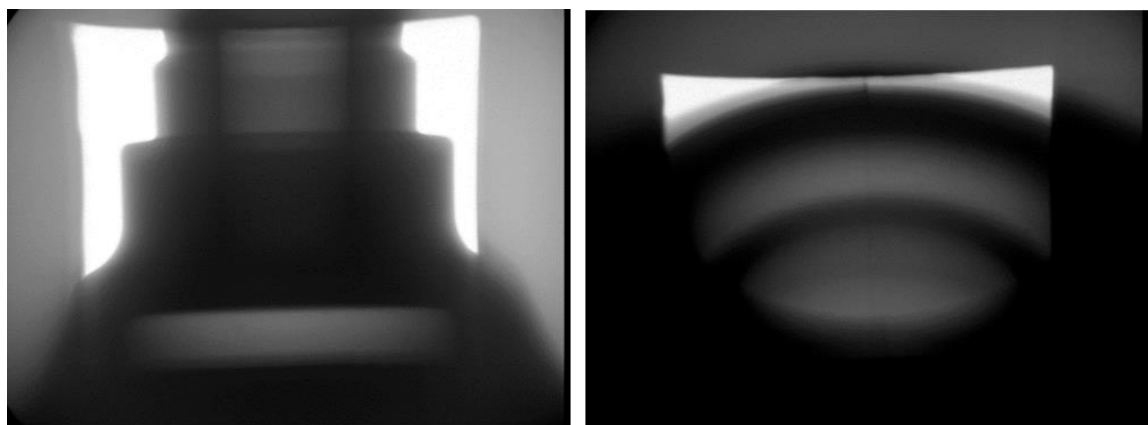


Figura 2d - Imagem de Raio-X retirado à peça 2, nas zonas do canhão e corpo (à esquerda) e flange (à direita).

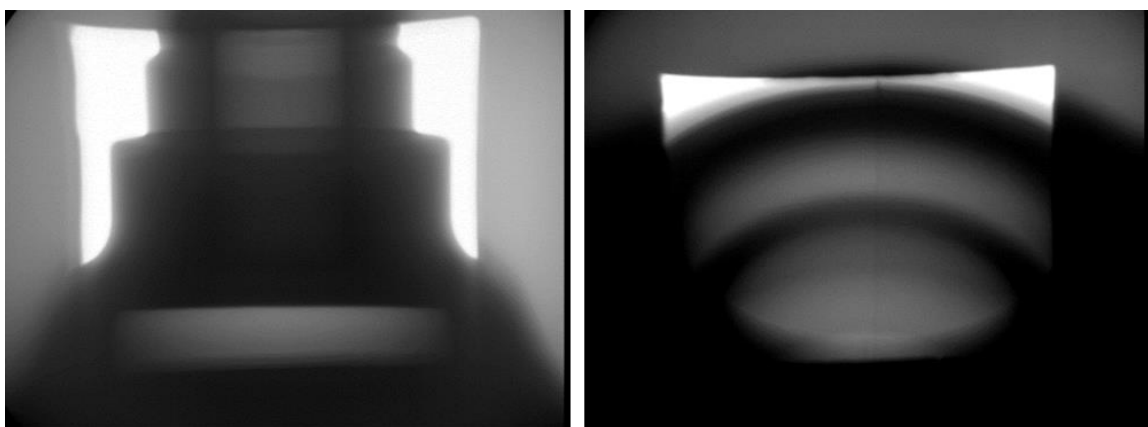


Figura 3d - Imagem de Raio-X retirado à peça 3, nas zonas do canhão e corpo (à esquerda) e flange (à direita).

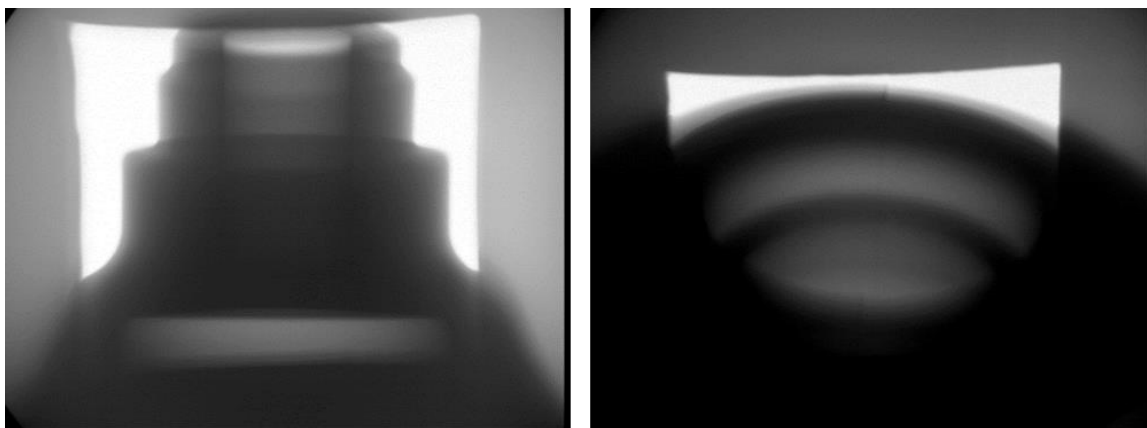


Figura 4d - Imagem de Raio-X retirado à peça 4, nas zonas do canhão e corpo (à esquerda) e flange (à direita).

Referência 3391 – Produção

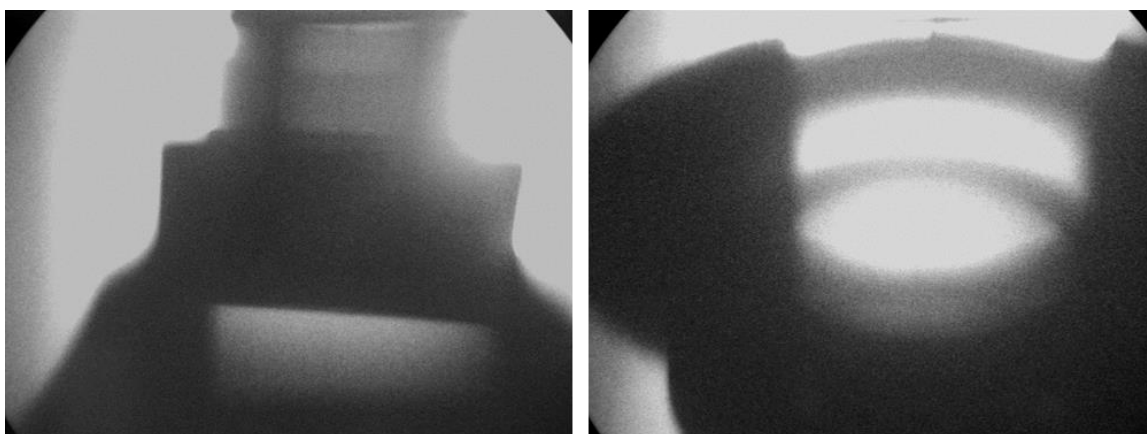


Figura 5d - Imagem de Raio-X retirado à peça 1, nas zonas do canhão e corpo (à esquerda) e flange (à direita).

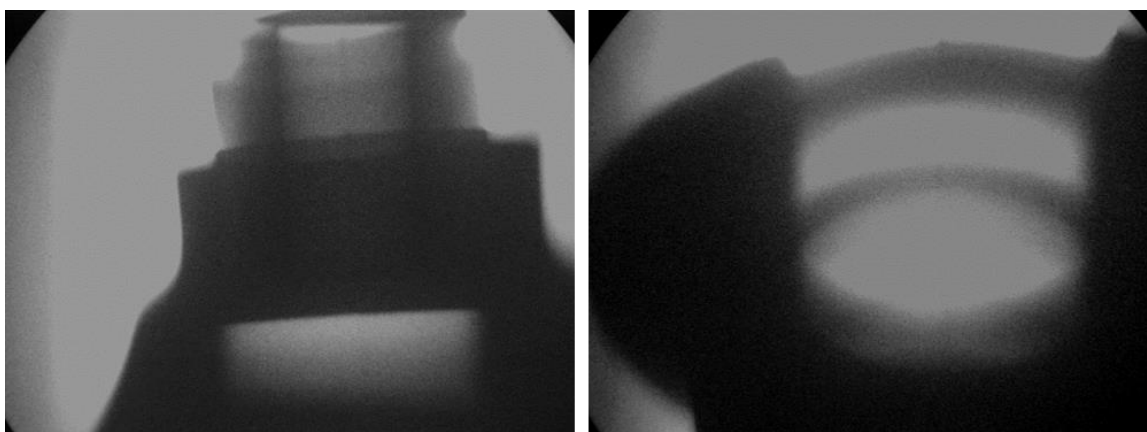


Figura 6d - Imagem de Raio-X retirado à peça 2, nas zonas do canhão e corpo (à esquerda) e flange (à direita).

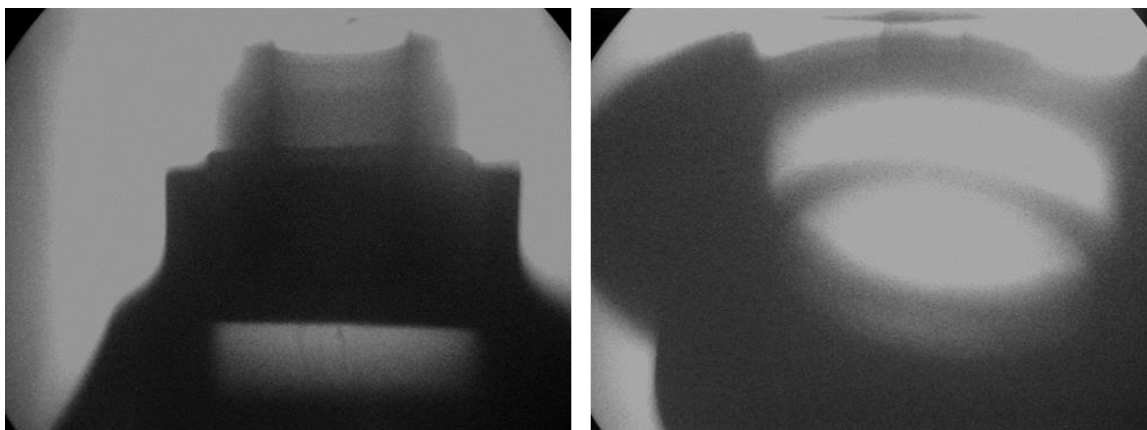


Figura 7d - Imagem de Raio-X retirado à peça 2, nas zonas do canhão e corpo (à esquerda) e flange (à direita).

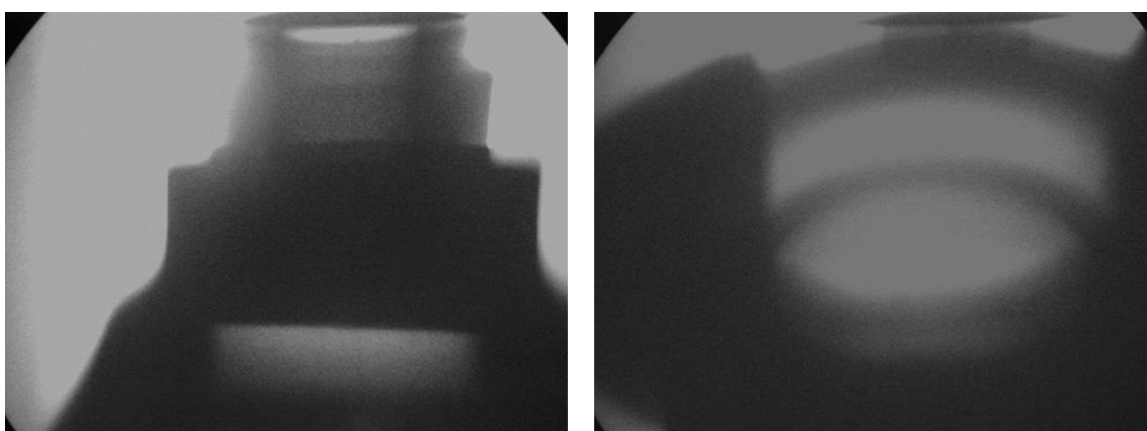


Figura 8d - Imagem de Raio-X retirado à peça 4, nas zonas do canhão e corpo (à esquerda) e flange (à direita).

Referência 3390

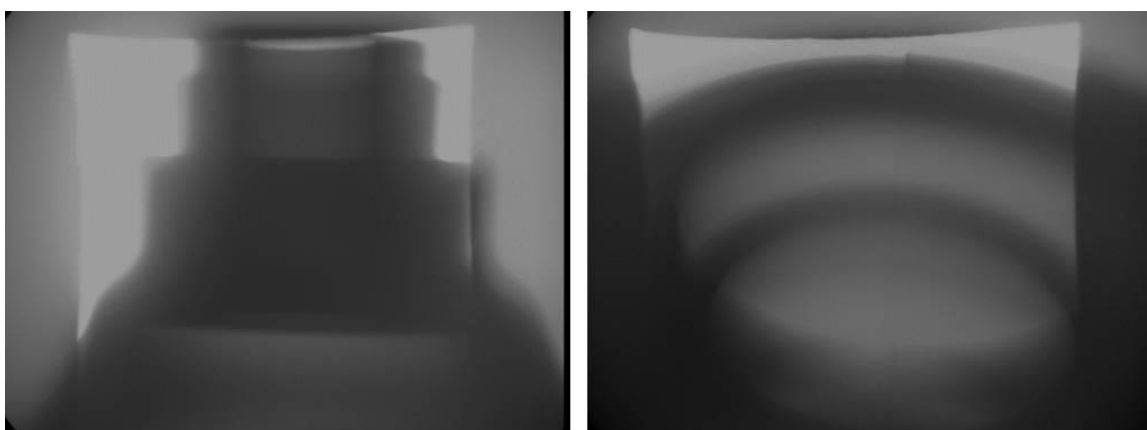


Figura 9d - Imagem de Raio-X retirado à peça 1, nas zonas do canhão e corpo (à esquerda) e flange (à direita).

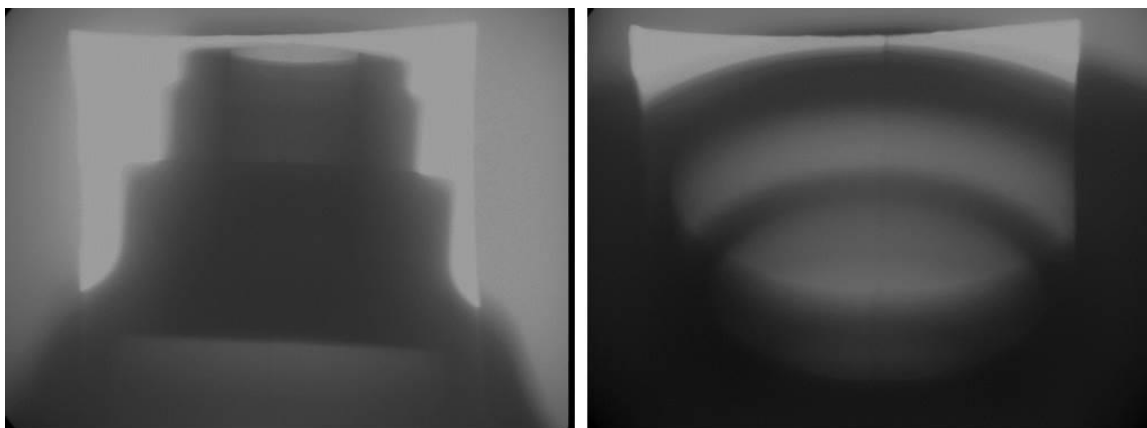


Figura 10d - Imagem de Raio-X retirado à peça 2, nas zonas do canhão e corpo (à esquerda) e flange (à direita).

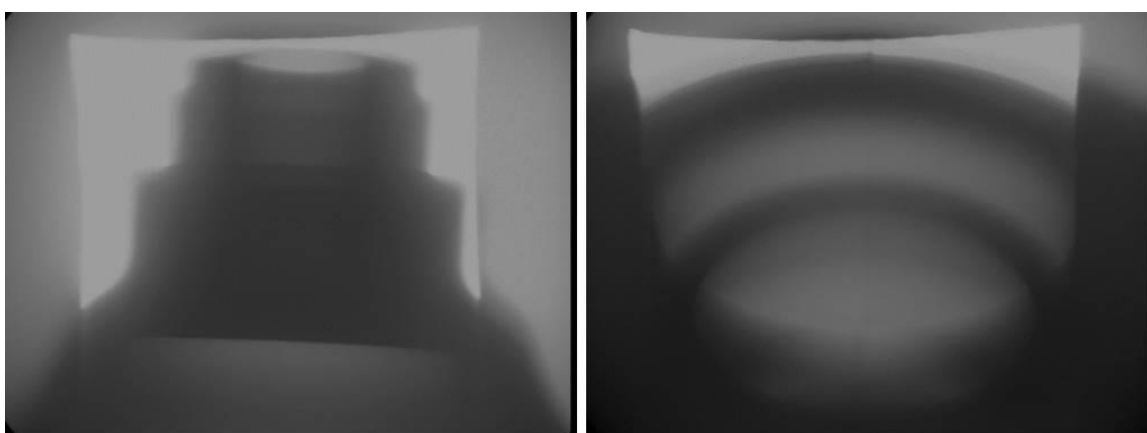


Figura 11d - Imagem de Raio-X retirado à peça 3, nas zonas do canhão e corpo (à esquerda) e flange (à direita).

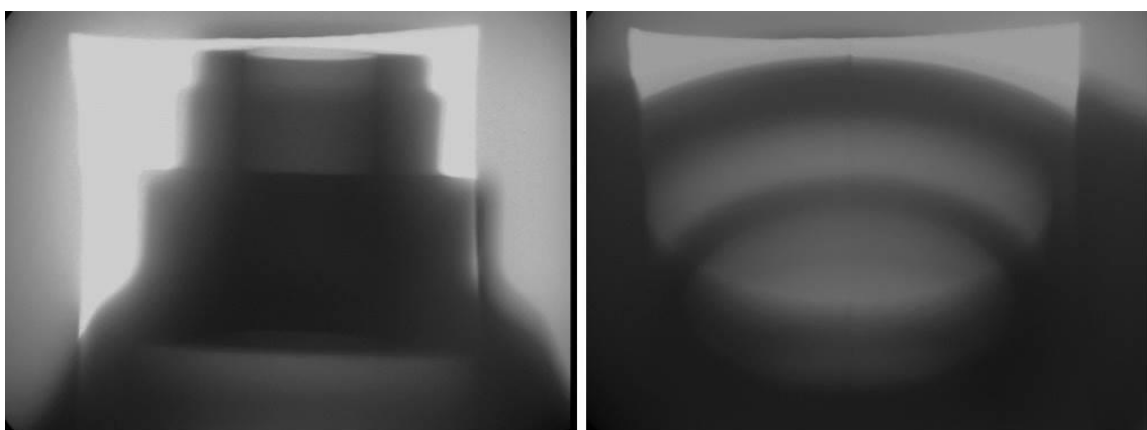


Figura 12d - Imagem de Raio-X retirado à peça 4, nas zonas do canhão e corpo (à esquerda) e flange (à direita).

Referência 3394

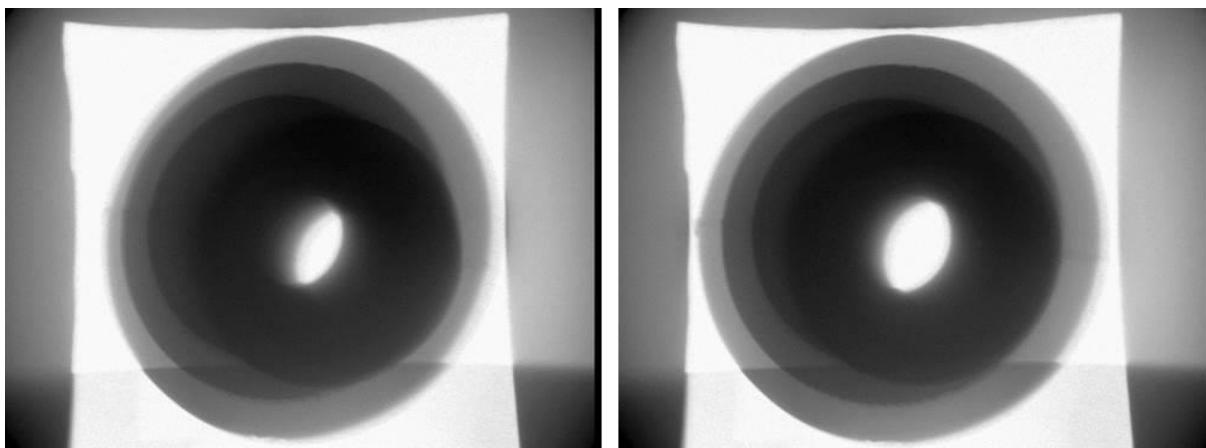


Figura 13d - Imagem de Raio-X retirado à peça 1 (esquerda) e à peça 2 (direita).

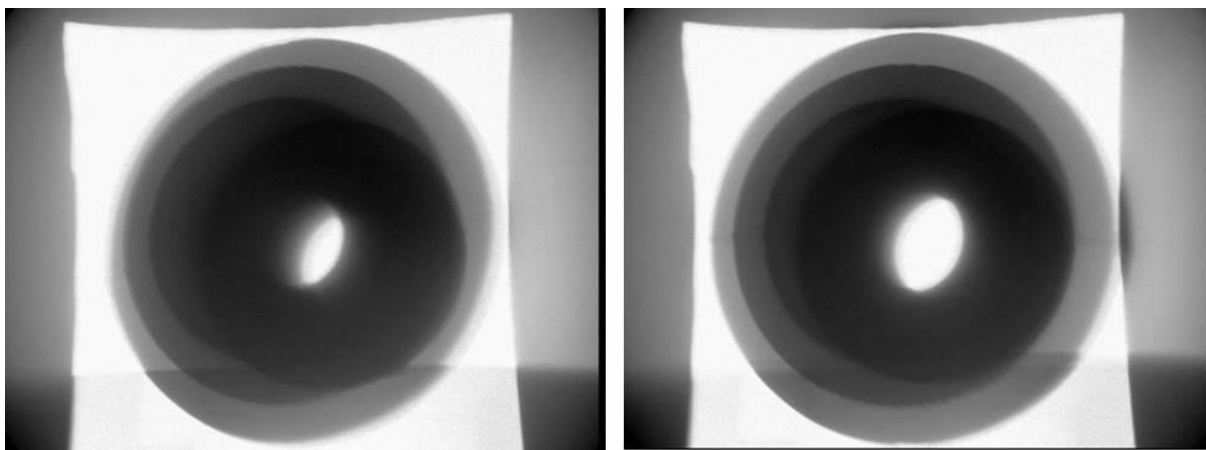


Figura 14d - Imagem de Raio-X retirado à peça 3 (esquerda) e à peça 4 (direita).

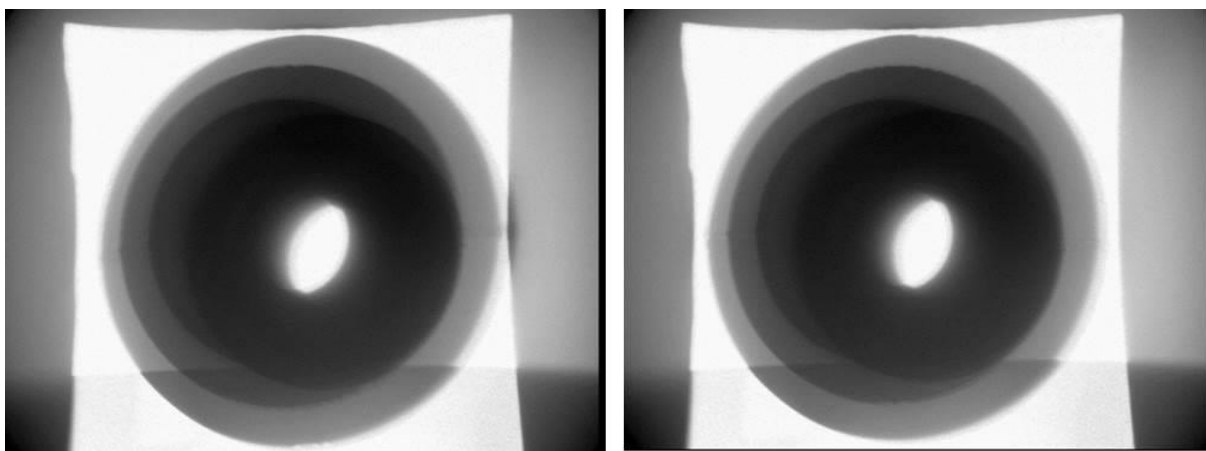


Figura 15d - Imagem de Raio-X retirado à peça 5 (esquerda) e à peça 6 (direita).

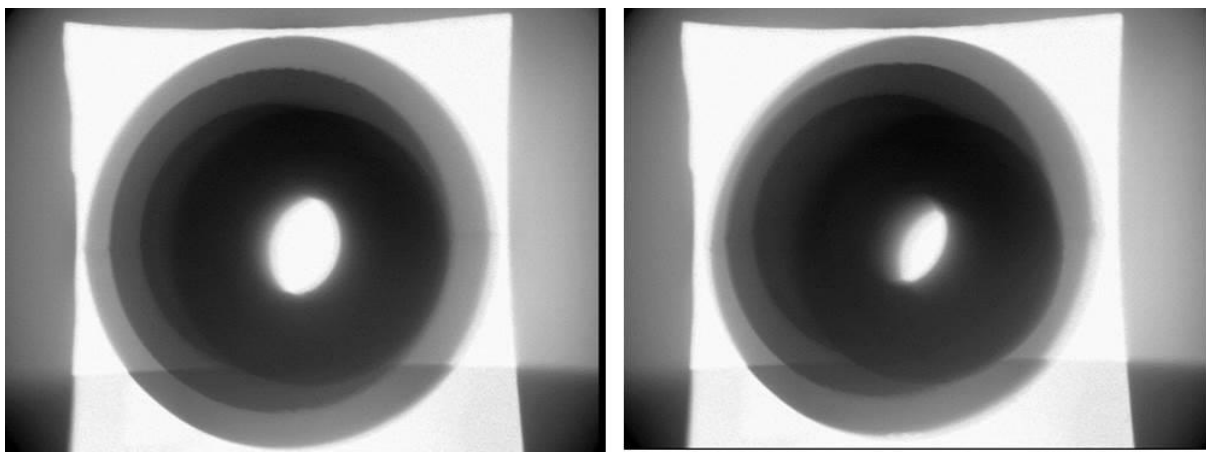


Figura 16d - Imagem de Raio-X retirado à peça 7 (esquerda) e à peça 8 (direita).

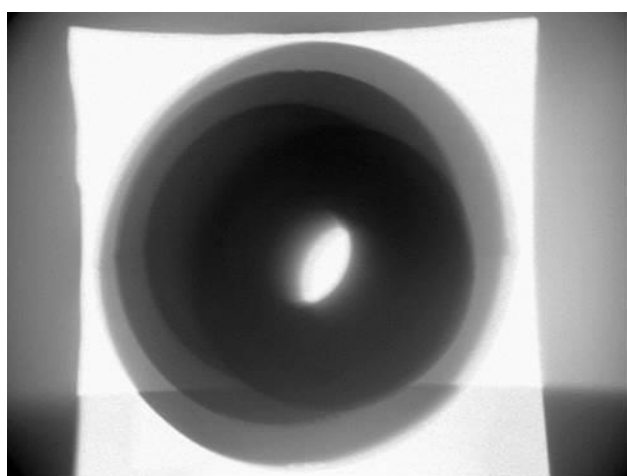


Figura 17d - Imagem de Raio-X retirado à peça 9.

Referência 3393

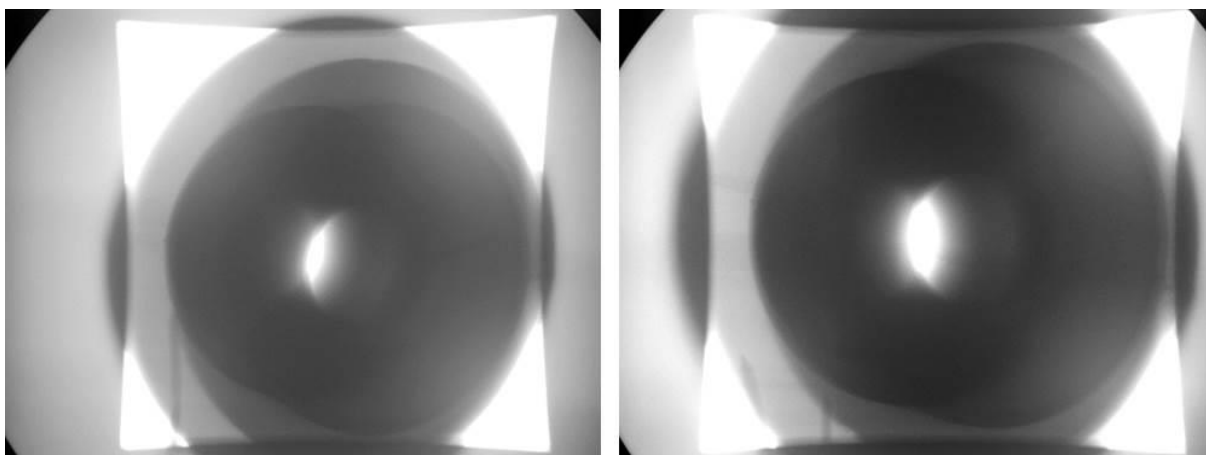


Figura 18d - Imagem de Raio-X retirado à peça 1 (esquerda) e à peça 2 (direita).

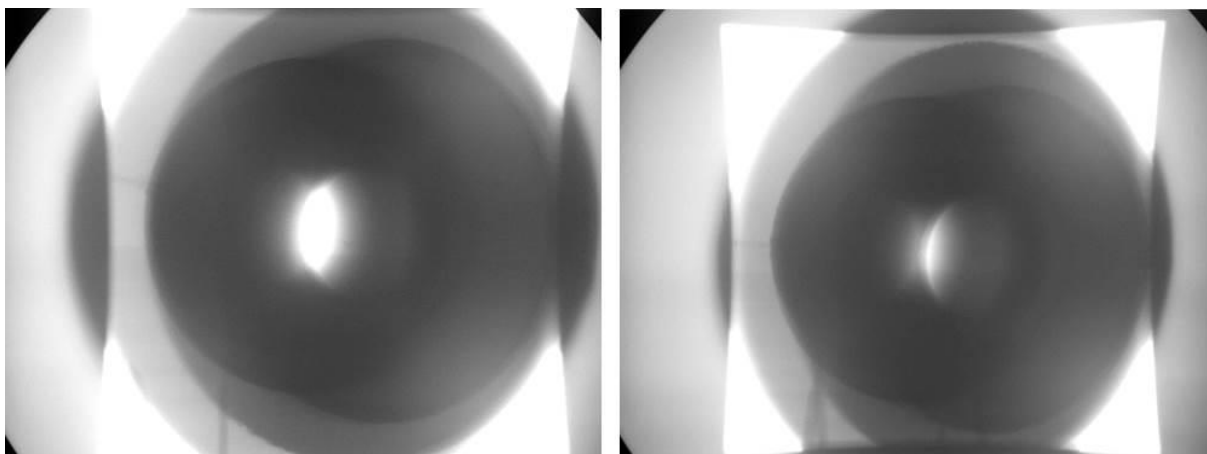


Figura 19d - Imagem de Raio-X retirado à peça 3 (esquerda) e à peça 4 (direita).

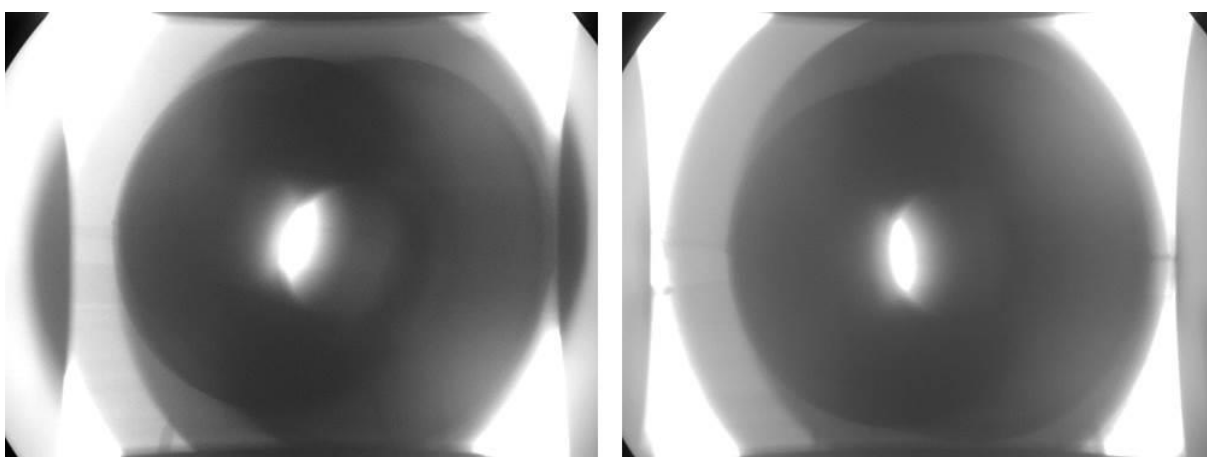


Figura 20d - Imagem de Raio-X retirado à peça 5 (esquerda) e à peça 6 (direita).

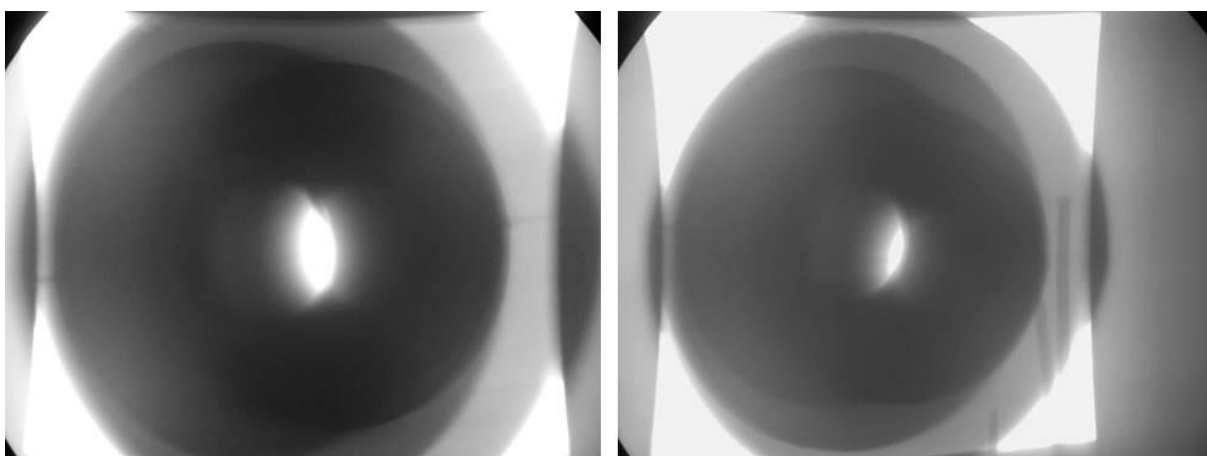


Figura 21d - Imagem de Raio-X retirado à peça 7 (esquerda) e à peça 8 (direita).

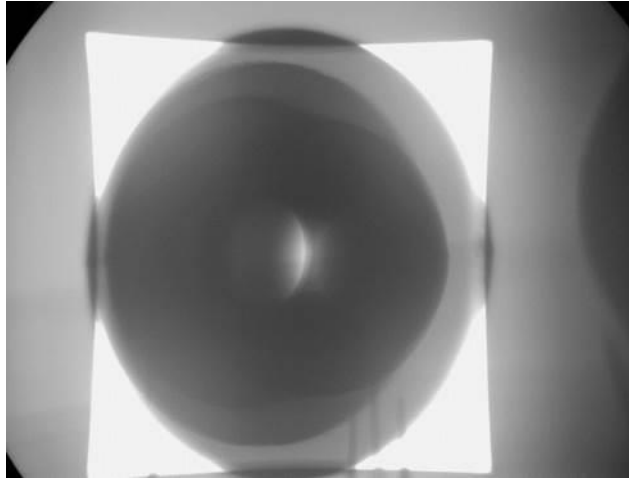


Figura 22d - Imagem de Raio-X retirado à peça 1 (esquerda) e à peça 9 (direita).

Anexo E

Resultados da análise da sanidade das peças através de ensaio de Líquidos Penetrantes.

Referência 3391

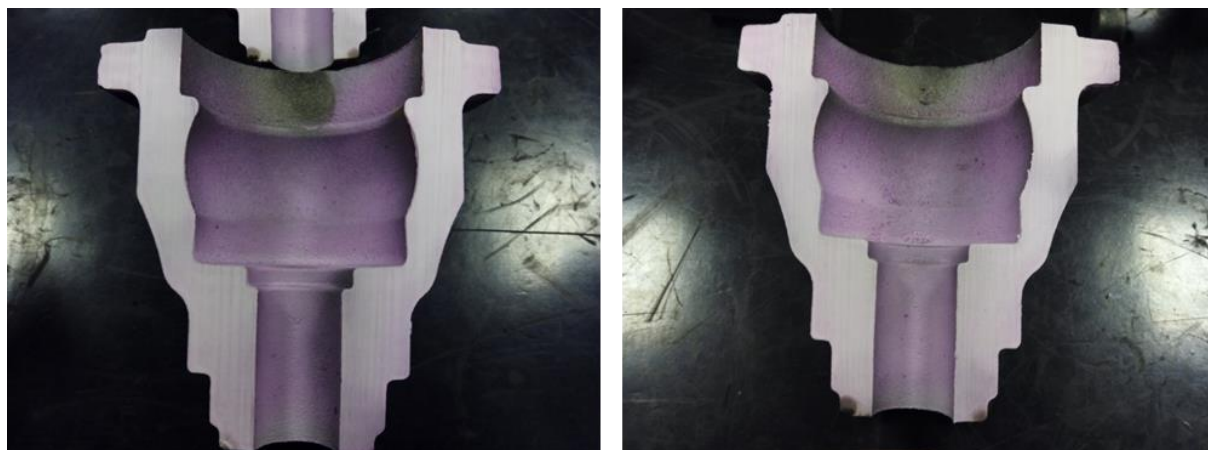


Figura 1e - Foto da peça 1, cortada segundo o plano de separação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

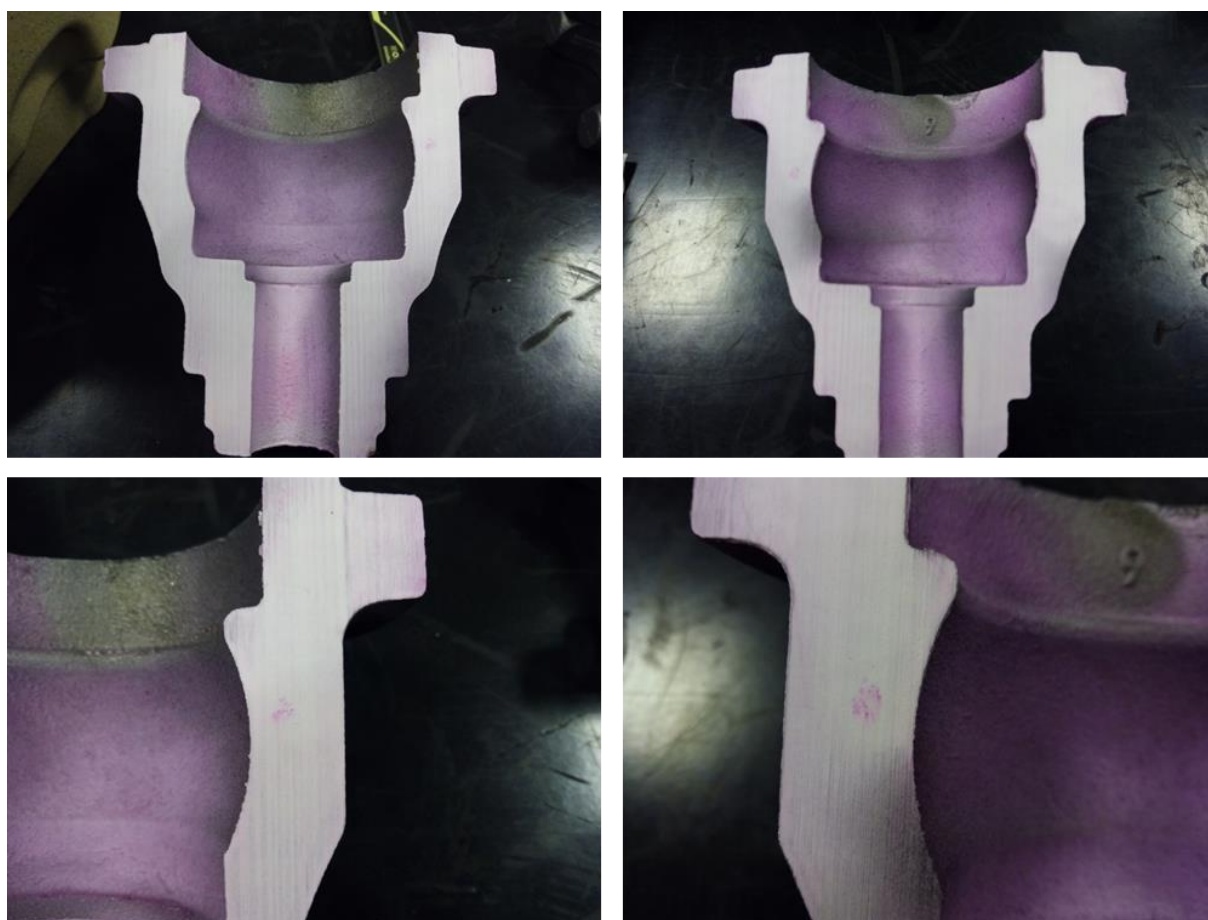


Figura 2e - Foto da peça 2, cortada segundo o plano de separação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

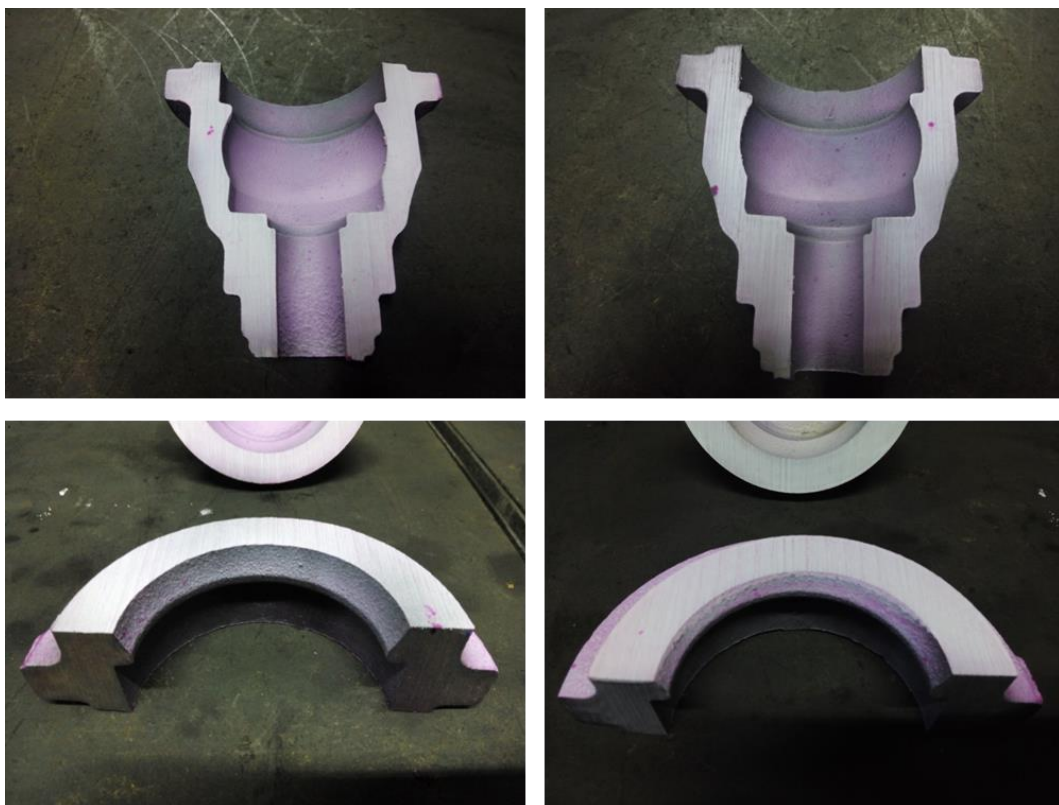


Figura 3e - Foto da peça 3, cortada segundo o plano de apartação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

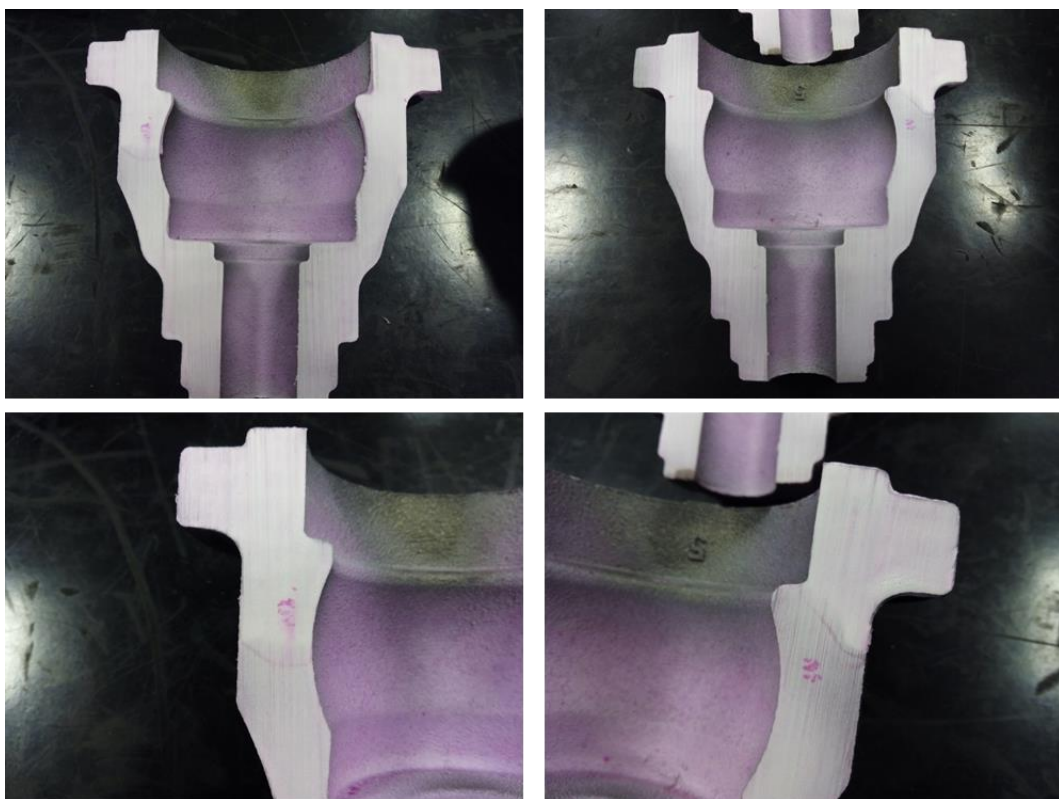


Figura 4e - Foto da peça 4, cortada segundo o plano de apartação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

Referência 3391 – Produção

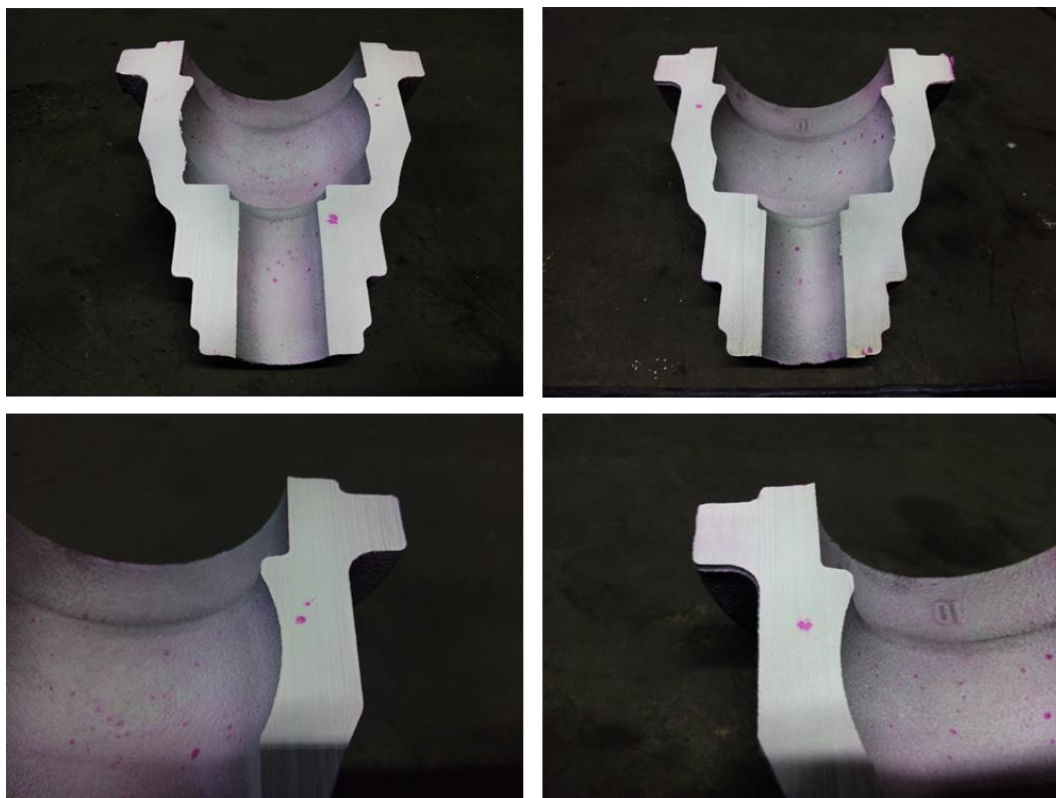


Figura 5e - Foto da peça 1, cortada segundo o plano de separação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

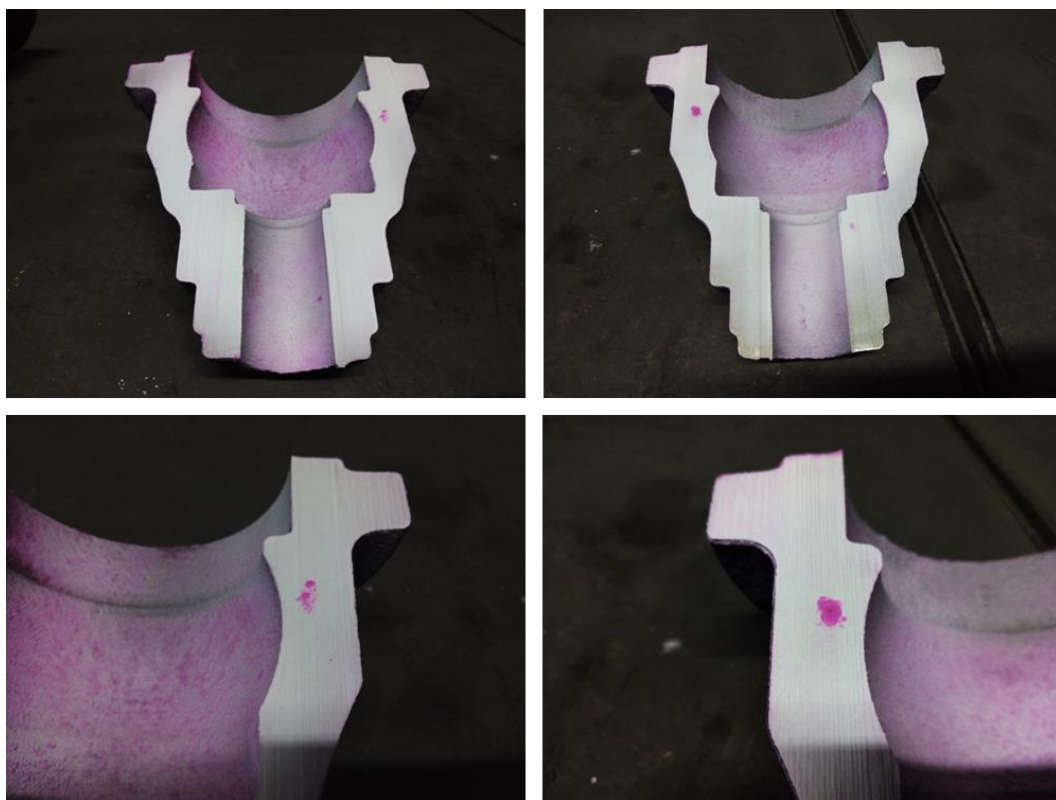


Figura 6e - Foto da peça 2, cortada segundo o plano de separação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

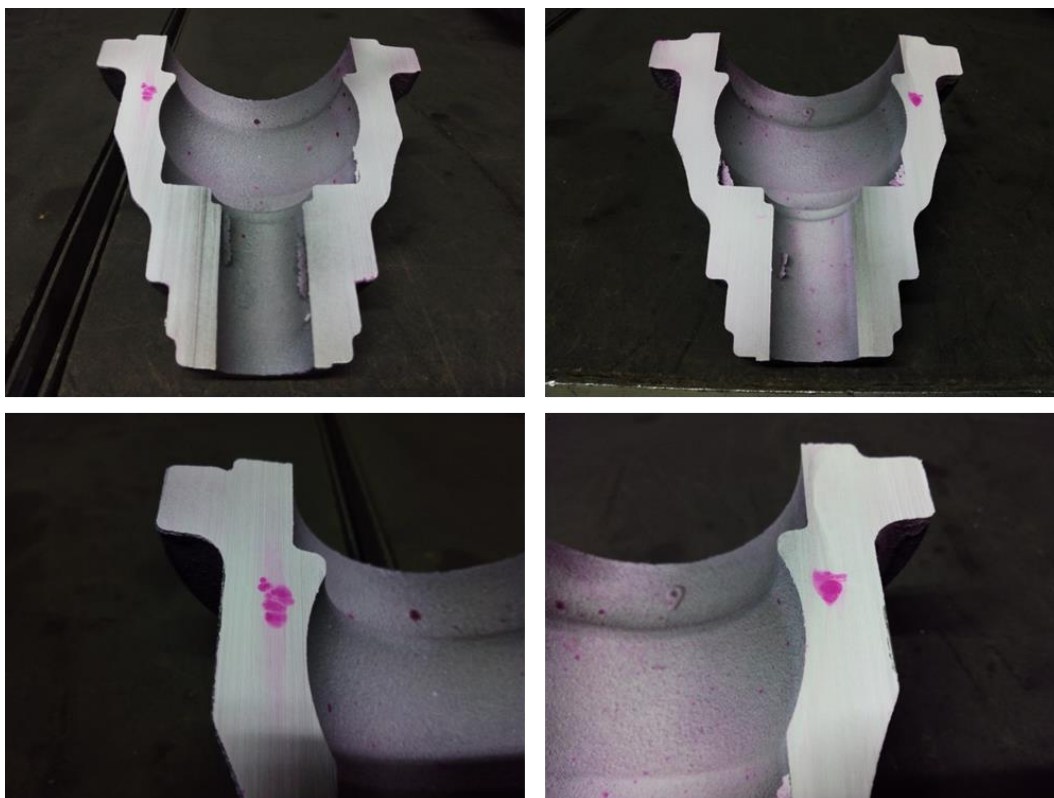


Figura 7e - Foto da peça 3, cortada segundo o plano de apartação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

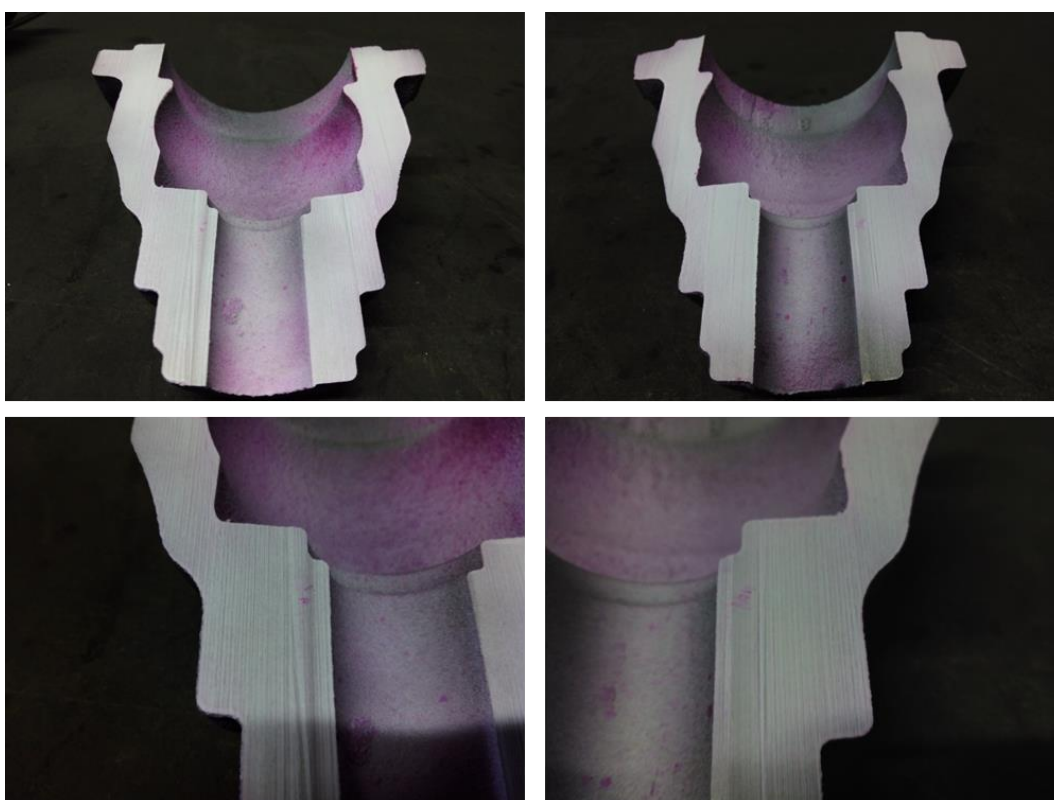


Figura 8e - Foto da peça 4, cortada segundo o plano de apartação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

Referência 3394

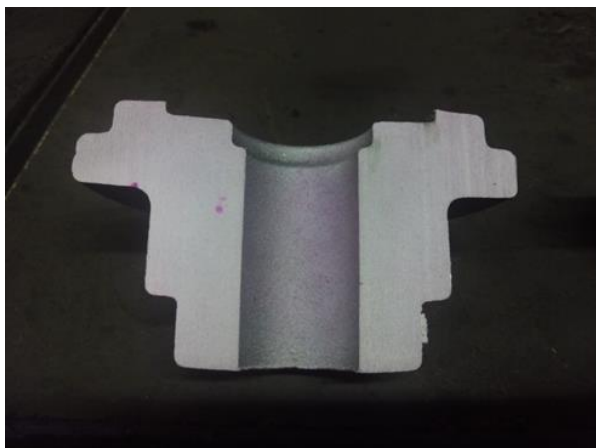


Figura 9e - Foto da peça 1, cortada segundo o plano de apartação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

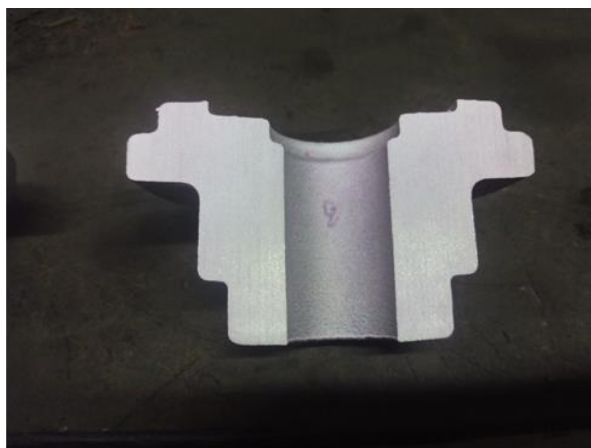
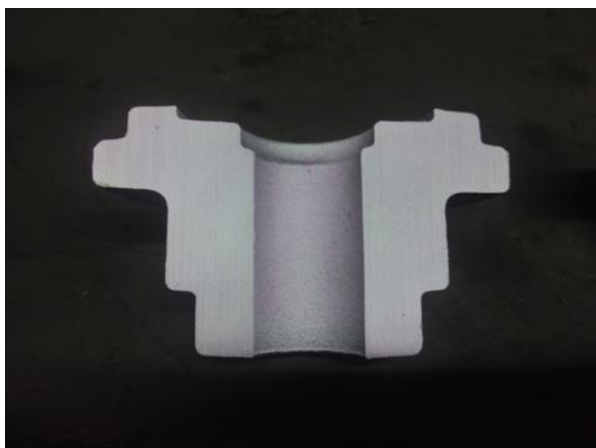


Figura 10e - Foto da peça 2, cortada segundo o plano de apartação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

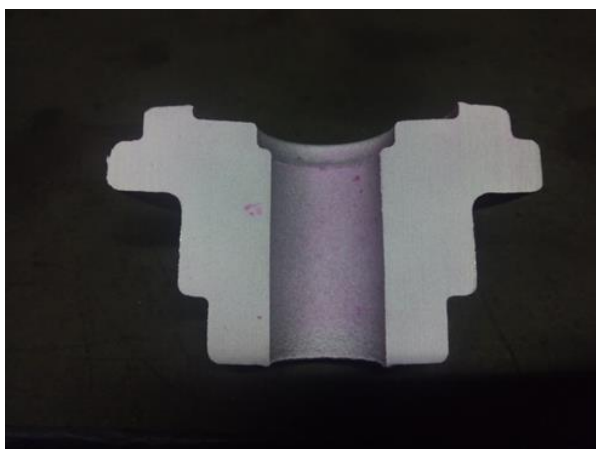


Figura 11e - Foto da peça 3, cortada segundo o plano de apartação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

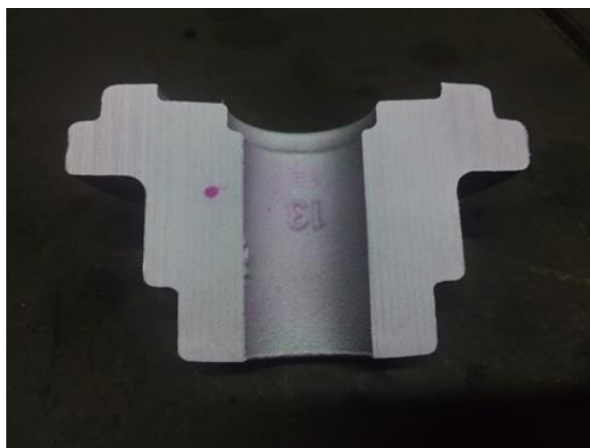
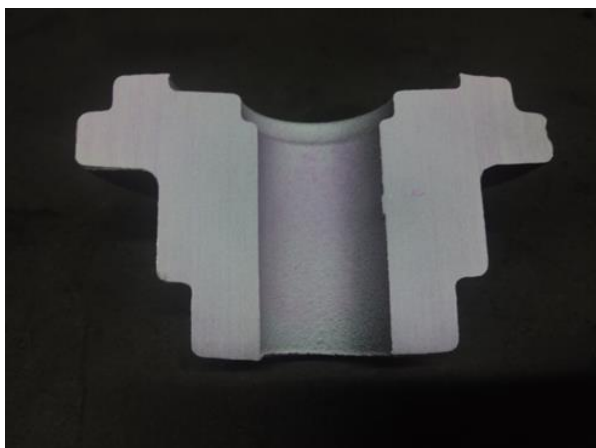


Figura 12e - Foto da peça 4, cortada segundo o plano de apartação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

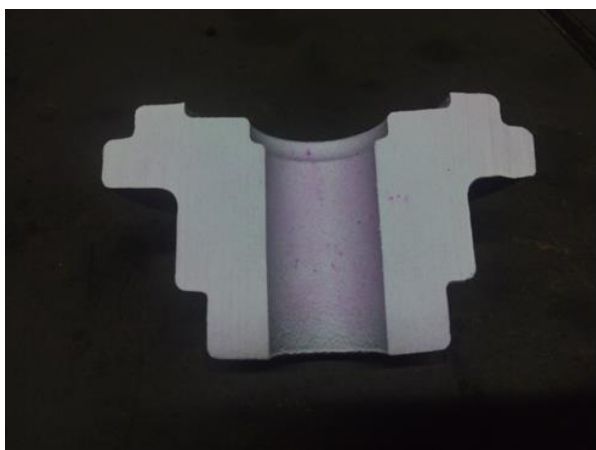


Figura 13e - Foto da peça 5, cortada segundo o plano de apartação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

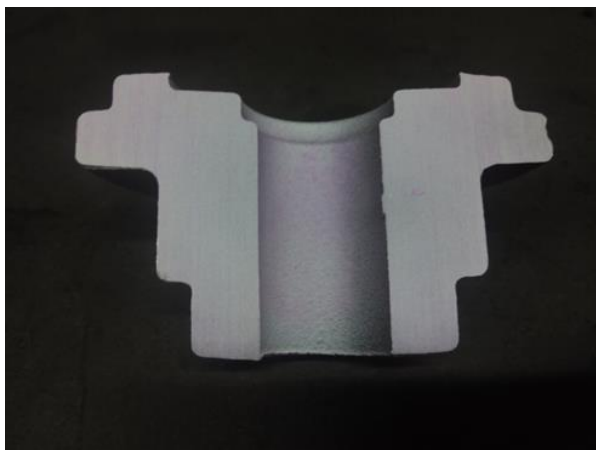


Figura 14e - Foto da peça 6, cortada segundo o plano de apartação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

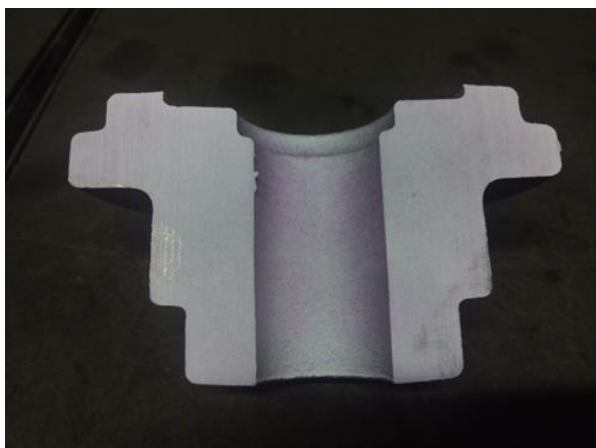


Figura 15e - Foto da peça 7, cortada segundo o plano de apartação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

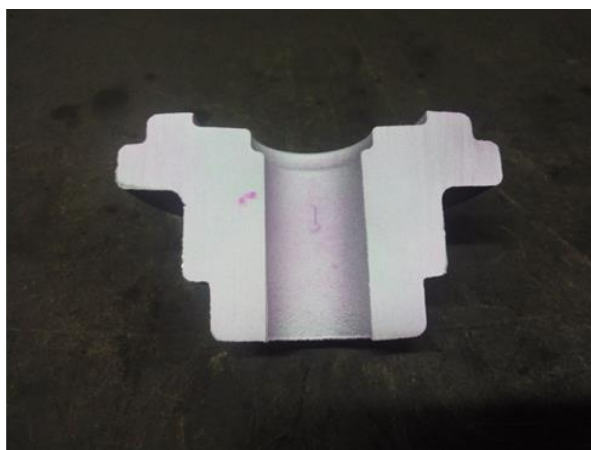


Figura 16e - Foto da peça 8, cortada segundo o plano de apartação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

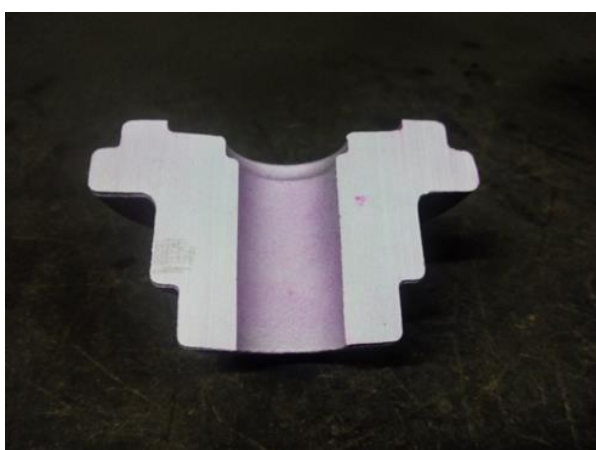


Figura 17e - Foto da peça 9, cortada segundo o plano de apartação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

Referência 3390

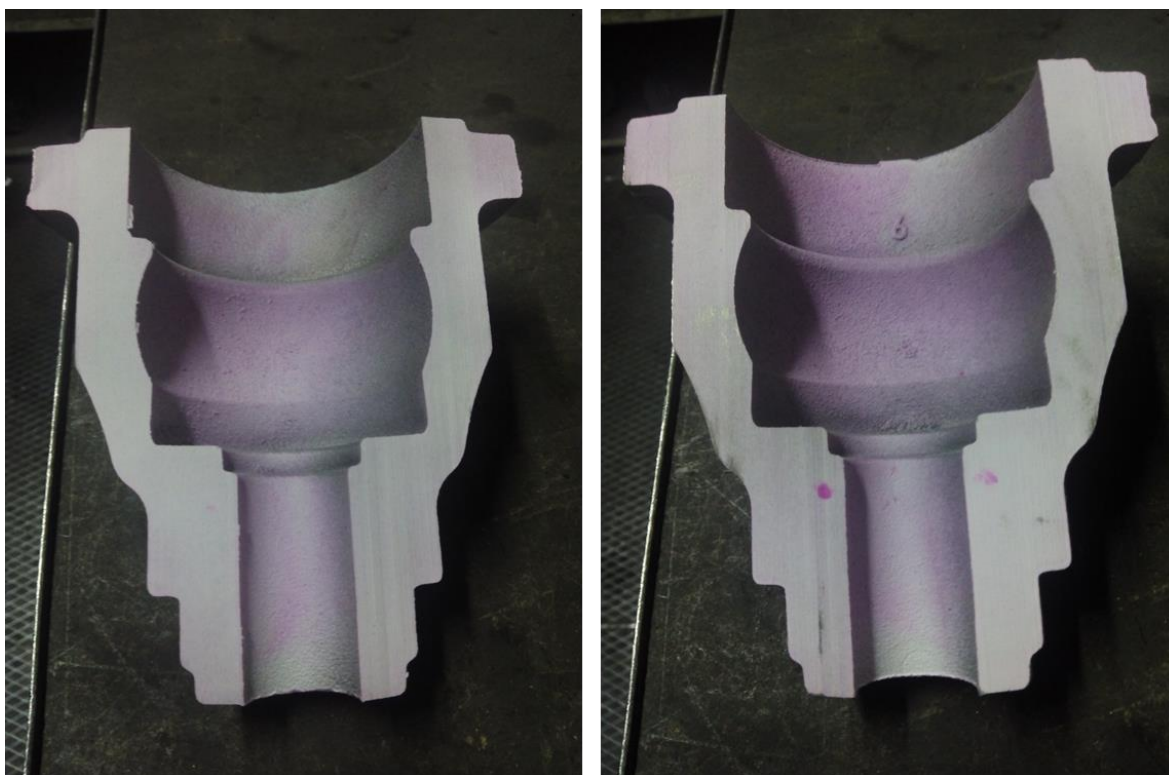


Figura 18e - Foto da peça 1, cortada segundo o plano de separação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

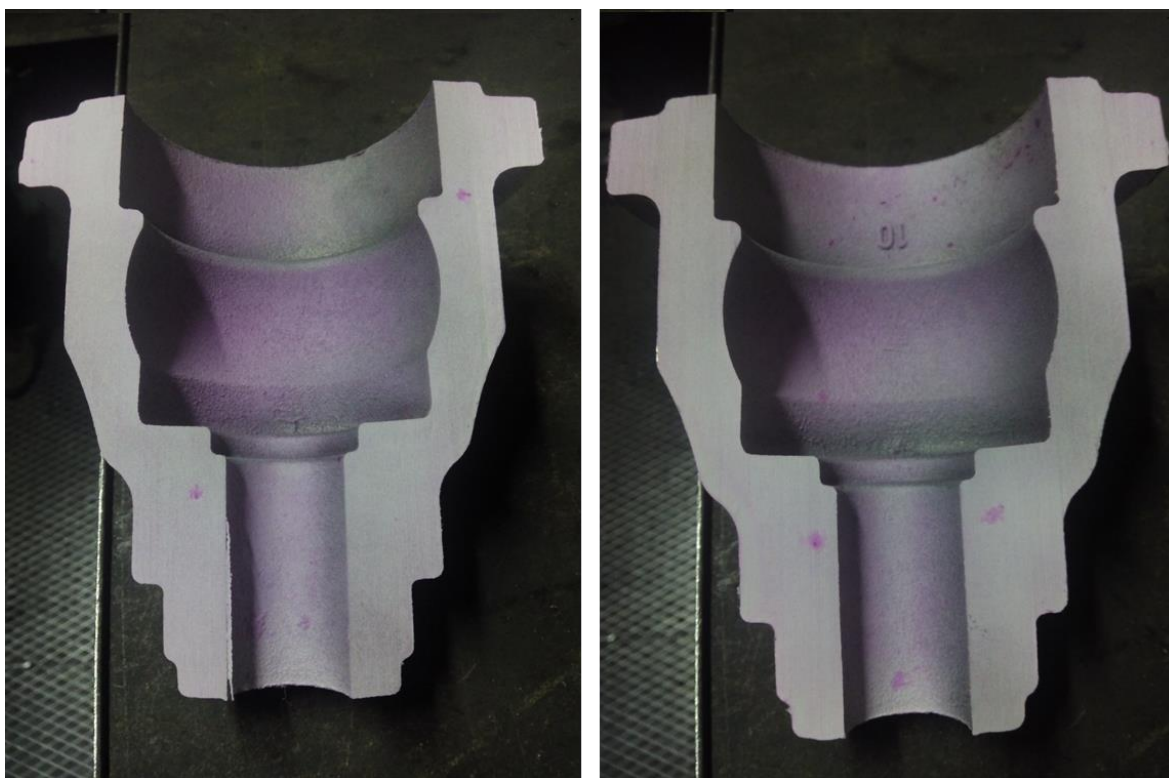


Figura 19e - Foto da peça 2, cortada segundo o plano de separação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

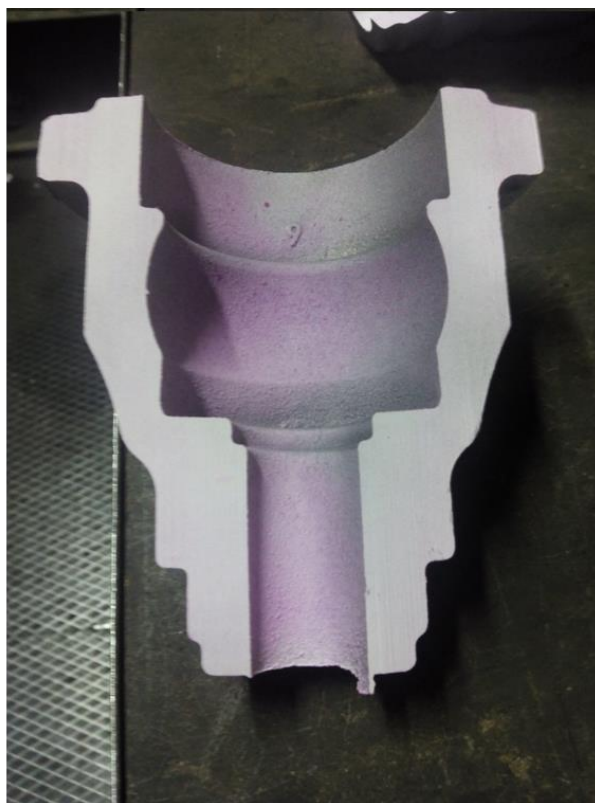
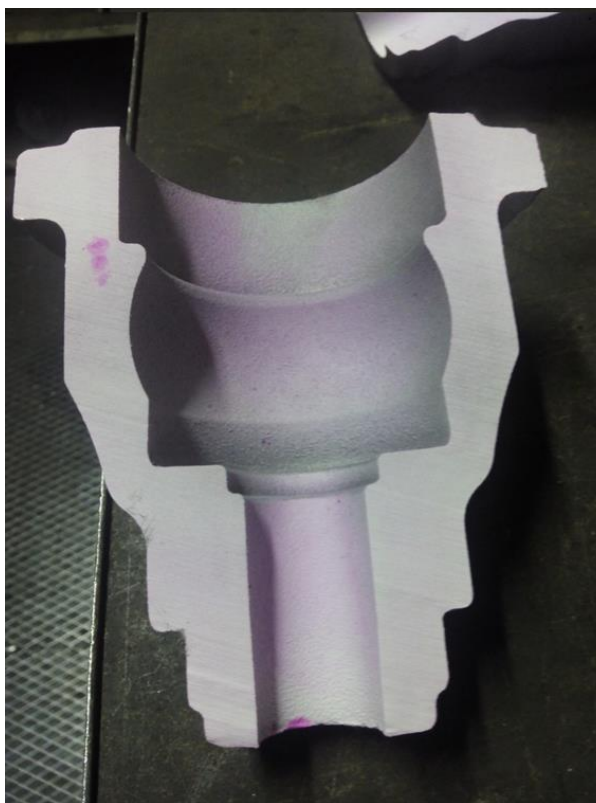


Figura 20e - Foto da peça 3, cortada segundo o plano de apartação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

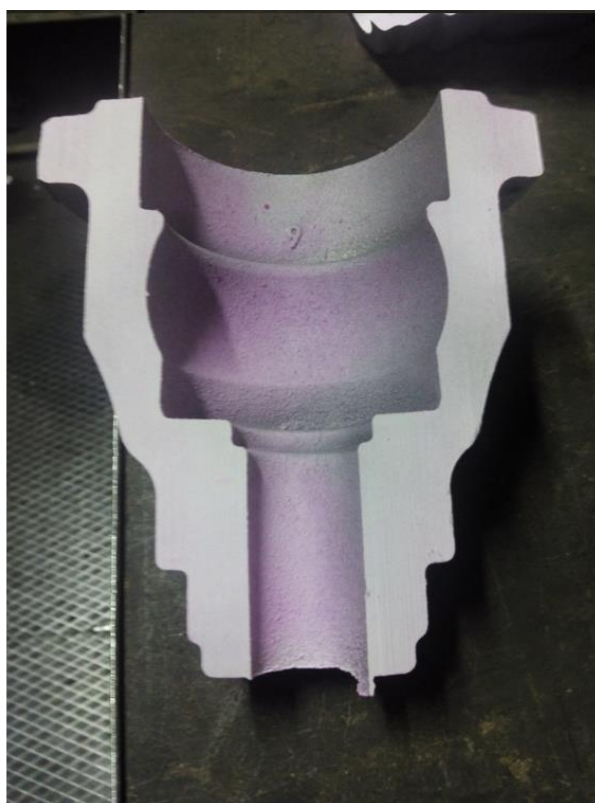
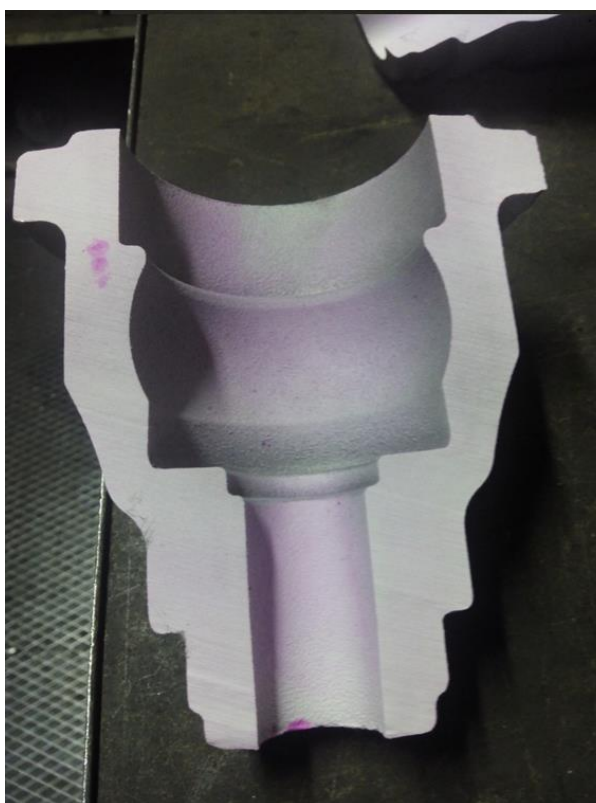


Figura 21e - Foto da peça 4, cortada segundo o plano de apartação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

Referência 3393

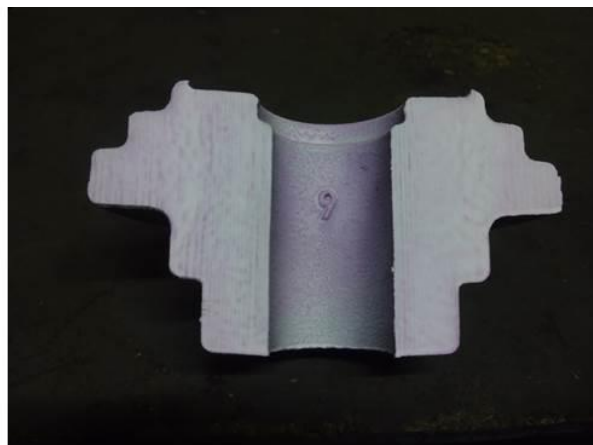
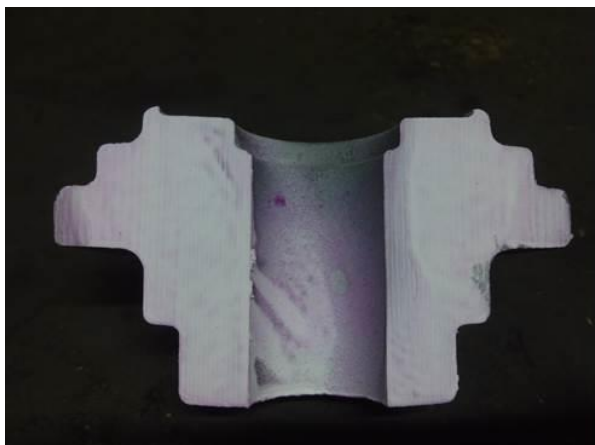


Figura 22e - Foto da peça 1, cortada segundo o plano de apartação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

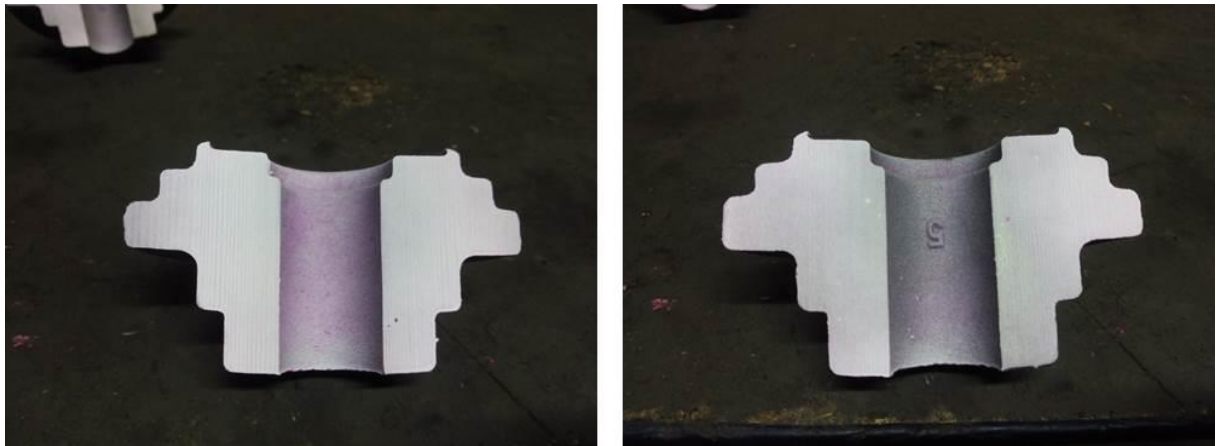


Figura 23e - Foto da peça 2, cortada segundo o plano de apartação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

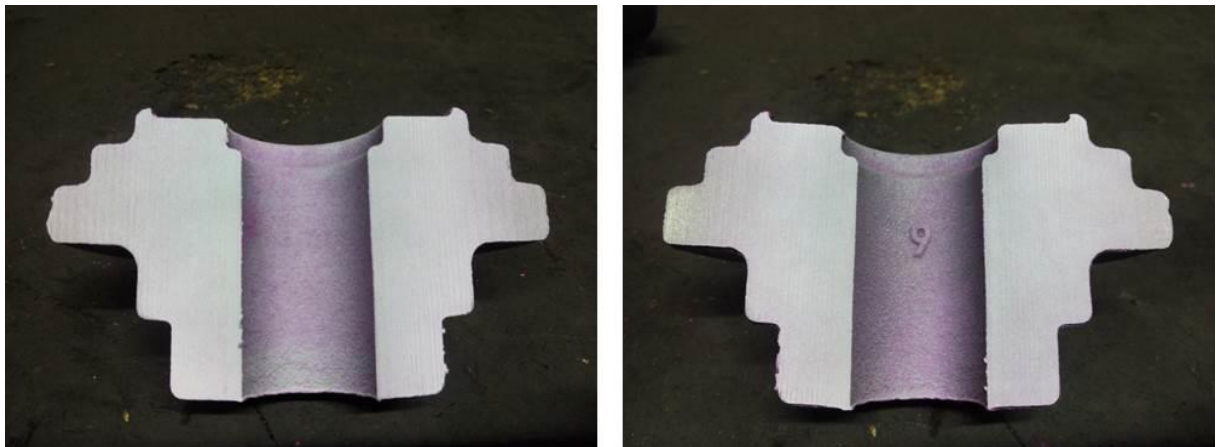


Figura 24e - Foto da peça 3, cortada segundo o plano de apartação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

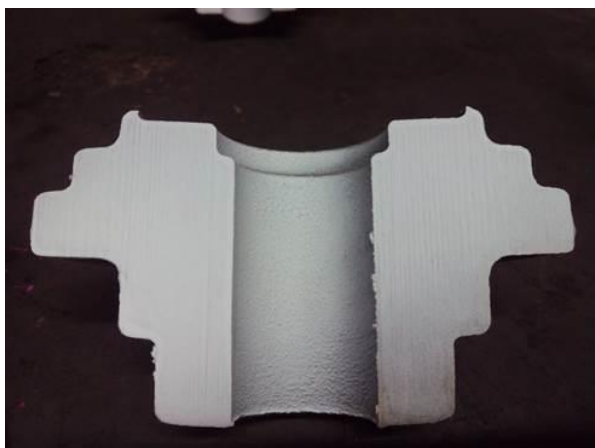


Figura 25e - Foto da peça 4, cortada segundo o plano de separação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

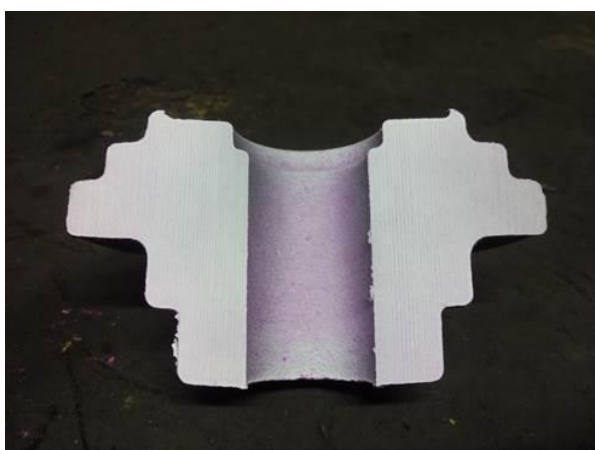


Figura 26e - Foto da peça 5, cortada segundo o plano de separação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

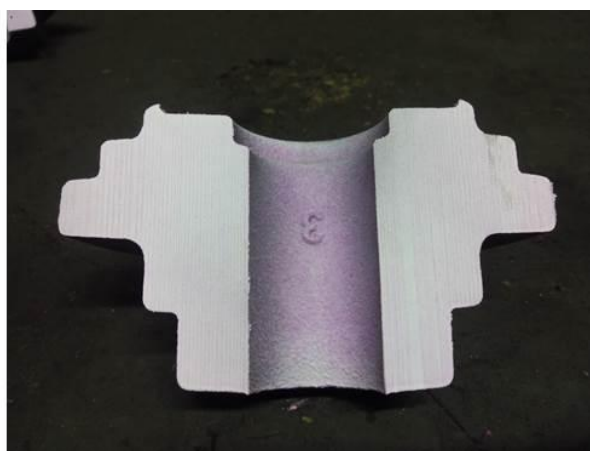
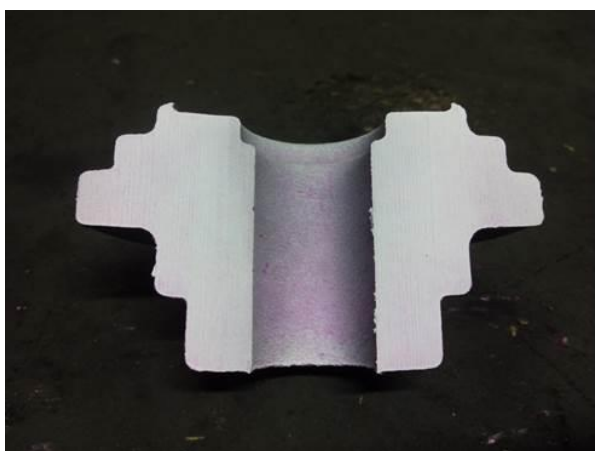


Figura 27e - Foto da peça 6, cortada segundo o plano de separação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

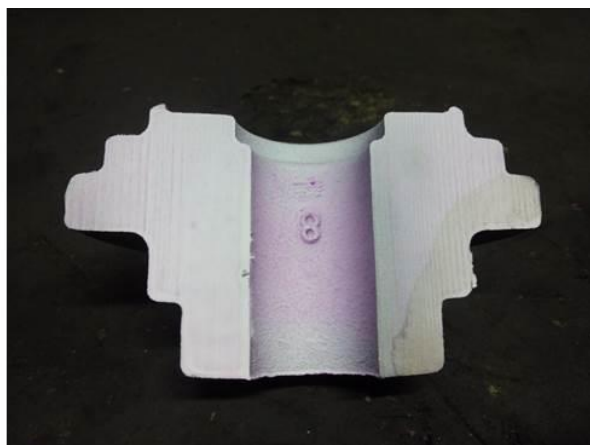
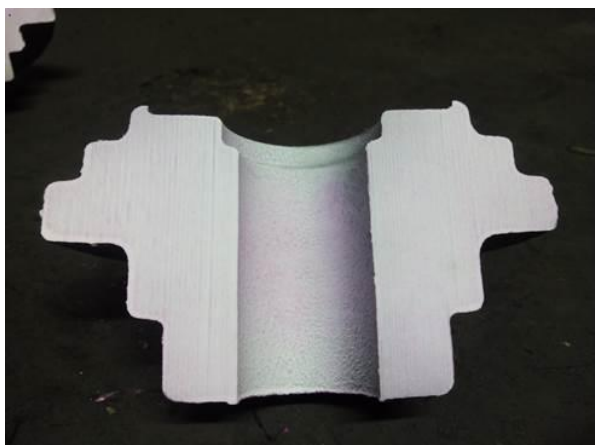


Figura 28e - Foto da peça 7, cortada segundo o plano de separação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

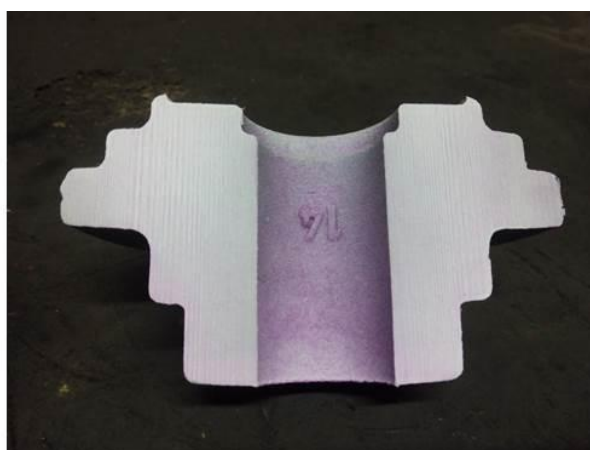
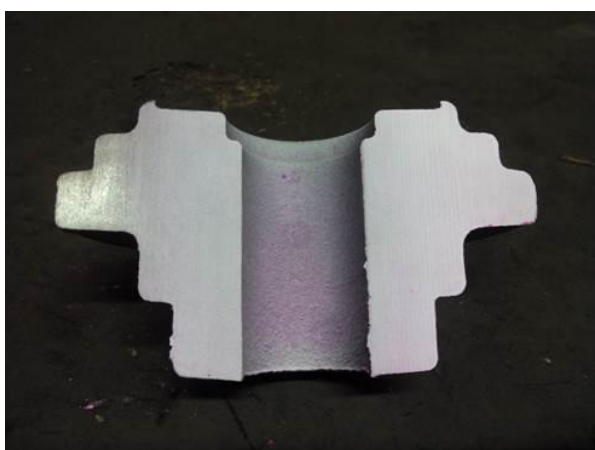


Figura 29e - Foto da peça 8, cortada segundo o plano de separação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

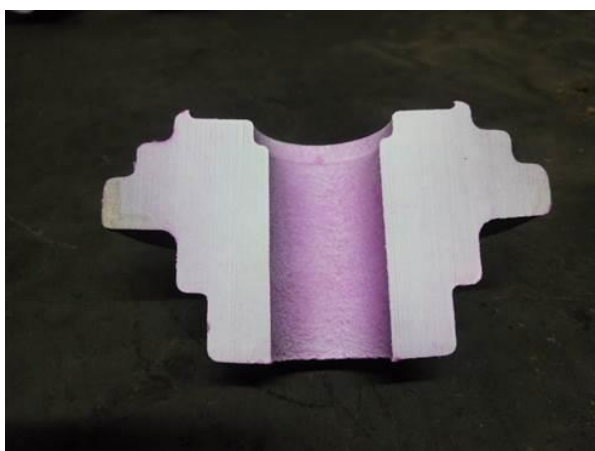


Figura 30e - Foto da peça 9, cortada segundo o plano de separação, depois do ensaio de Líquidos Penetrantes.

Anexo F

Perspetivas de malha e resultados de enchimento indicados pelo *Flow3D*

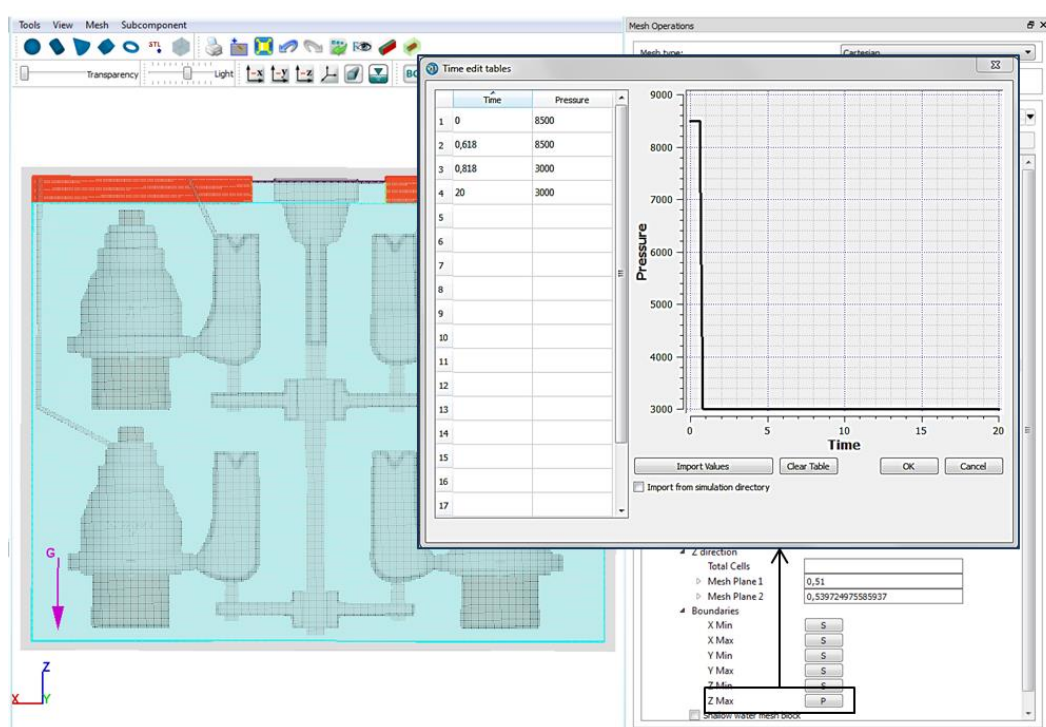


Figura 1f - Representação esquemática da curva de pressão associada às várias simulações.

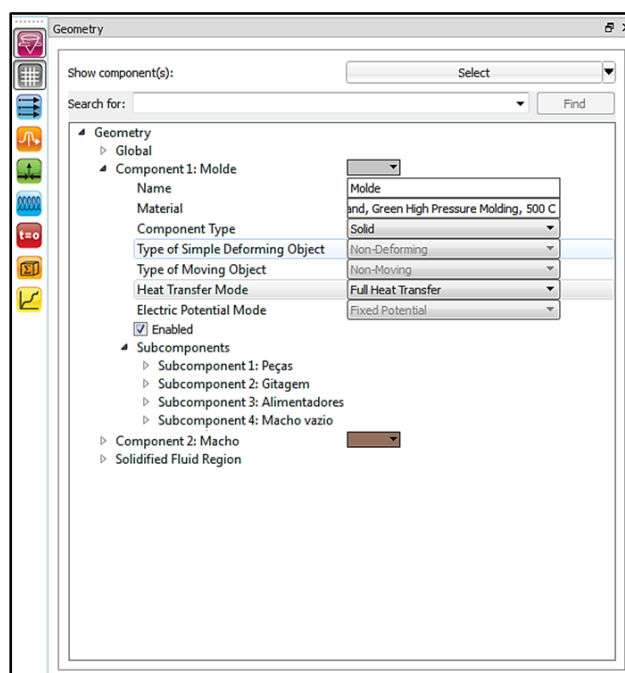


Figura 2f - Representação esquemática da árvore de geometrias.

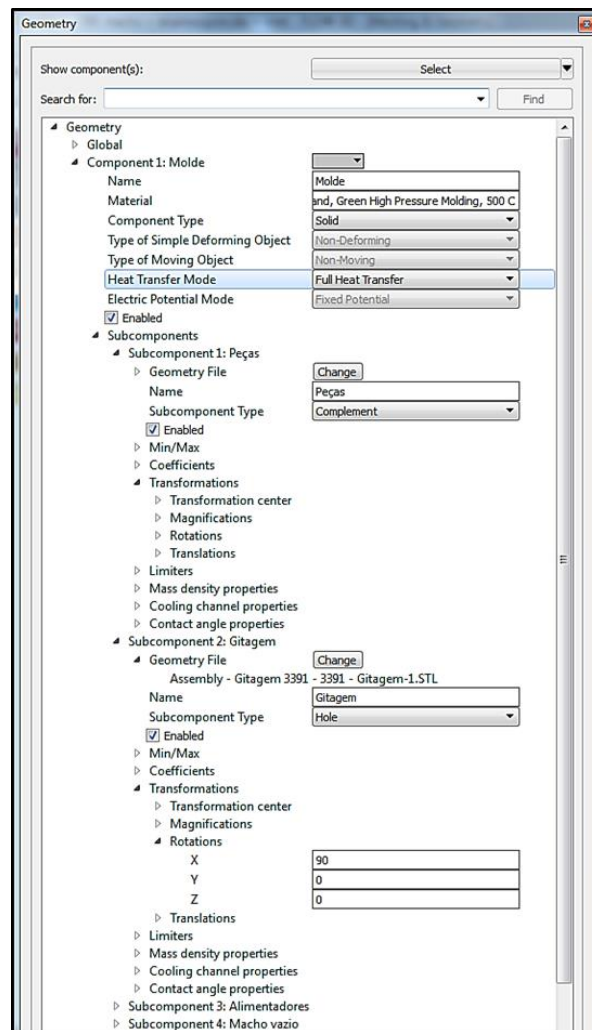


Figura 3f - Representação esquemática da árvore de geometrias, com os diferentes componentes e os respectivos “Labels”.

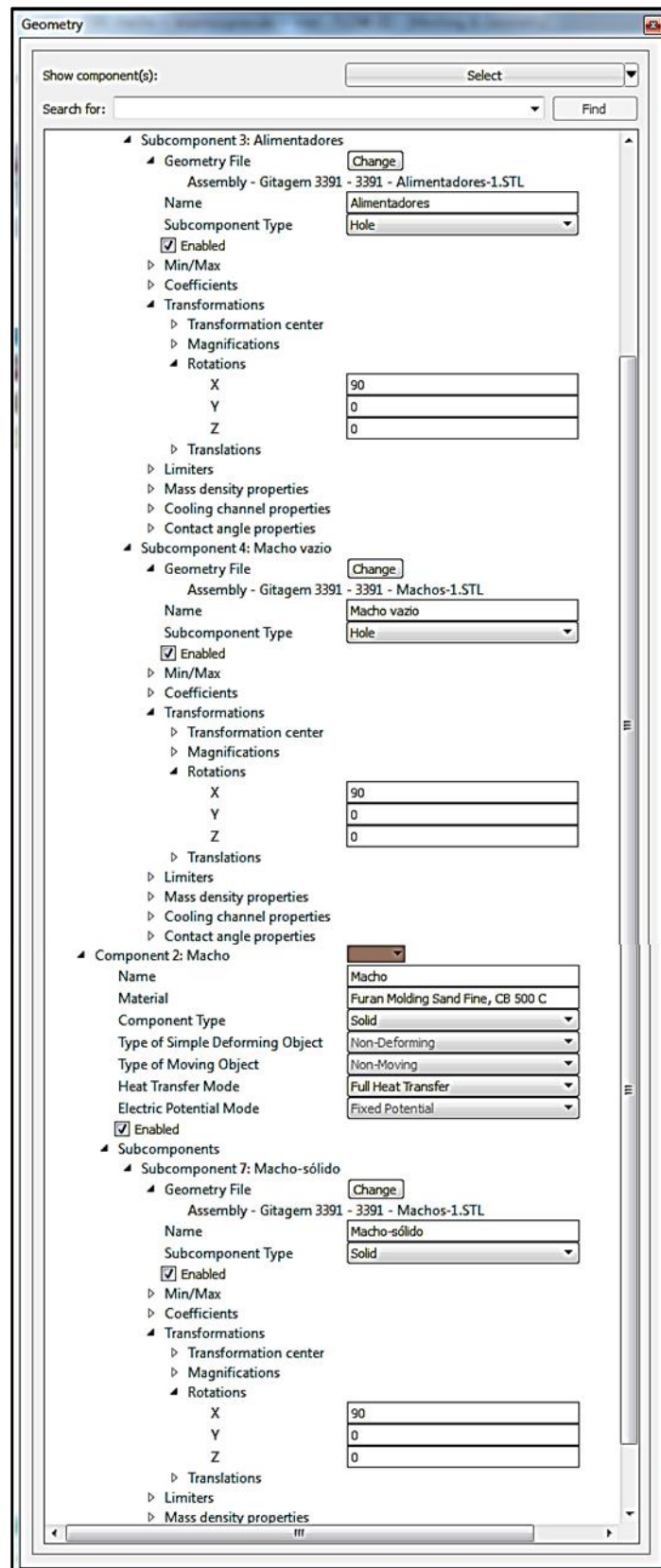


Figura 4f - Representação esquemática da árvore de geometrias, com os diferentes componentes e os respectivos “Labels”.

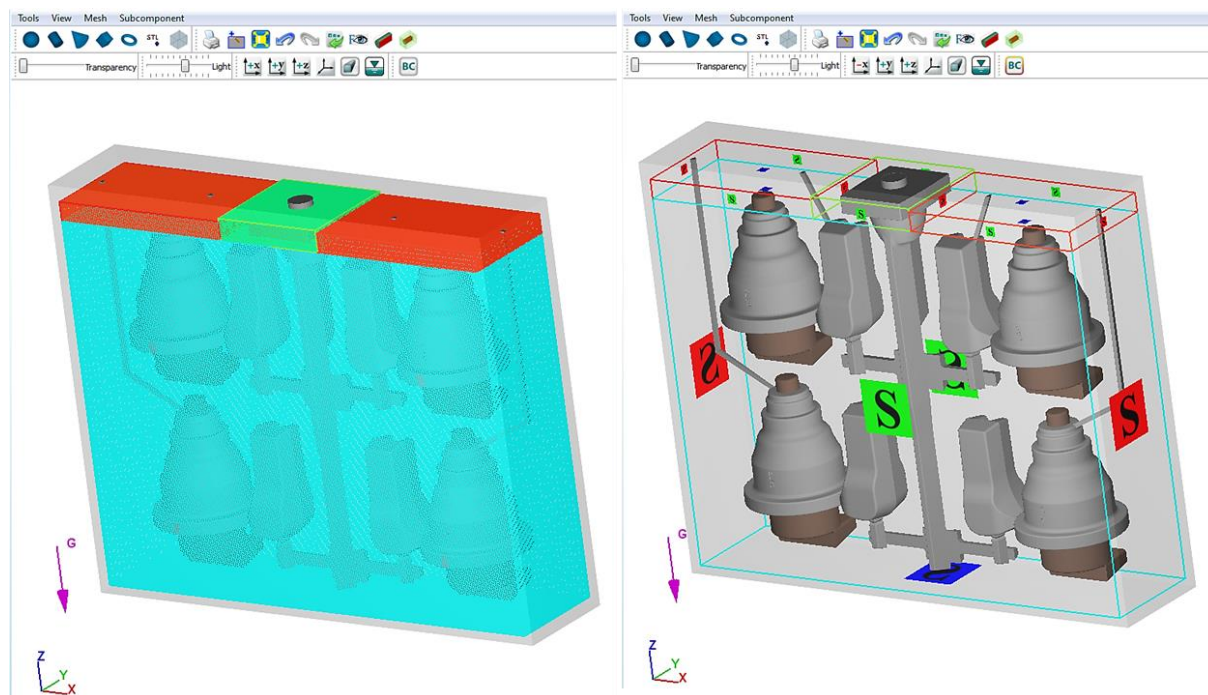


Figura 7f - Representação esquemática da perspectiva de malha (à esquerda), e da perspectiva do modelo (à direita).

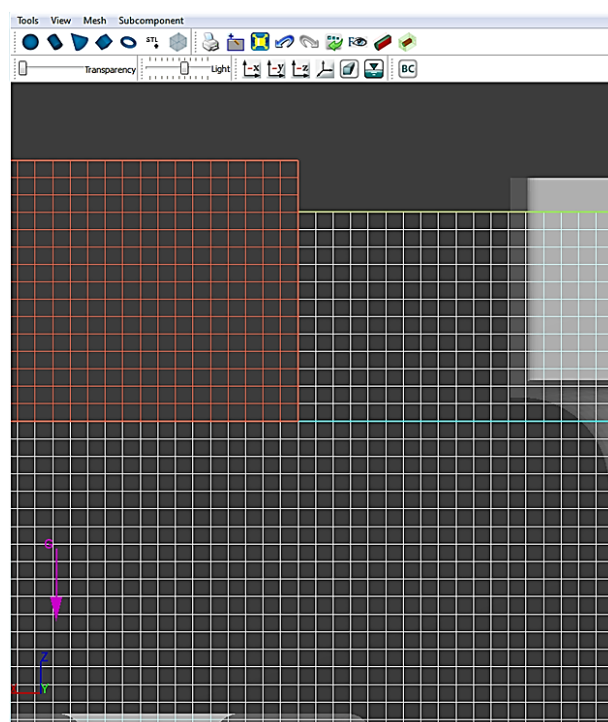


Figura 8f - Representação esquemática da perspectiva das diferentes malhas geradas.

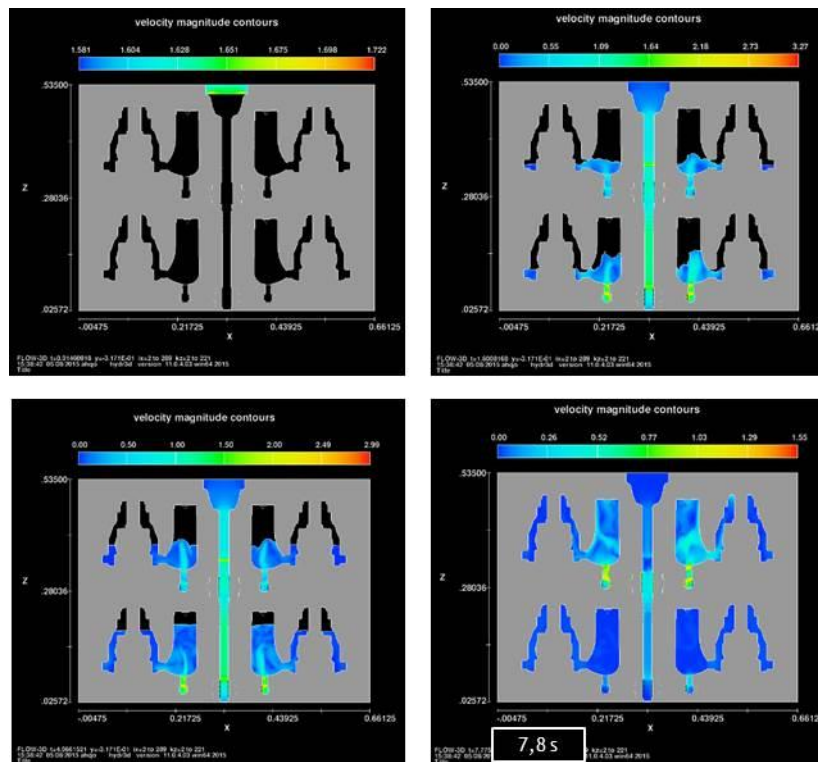


Figura 9f - Representação esquemática do enchimento da cavidade de moldação, em perspectiva 2D, da simulação 1.

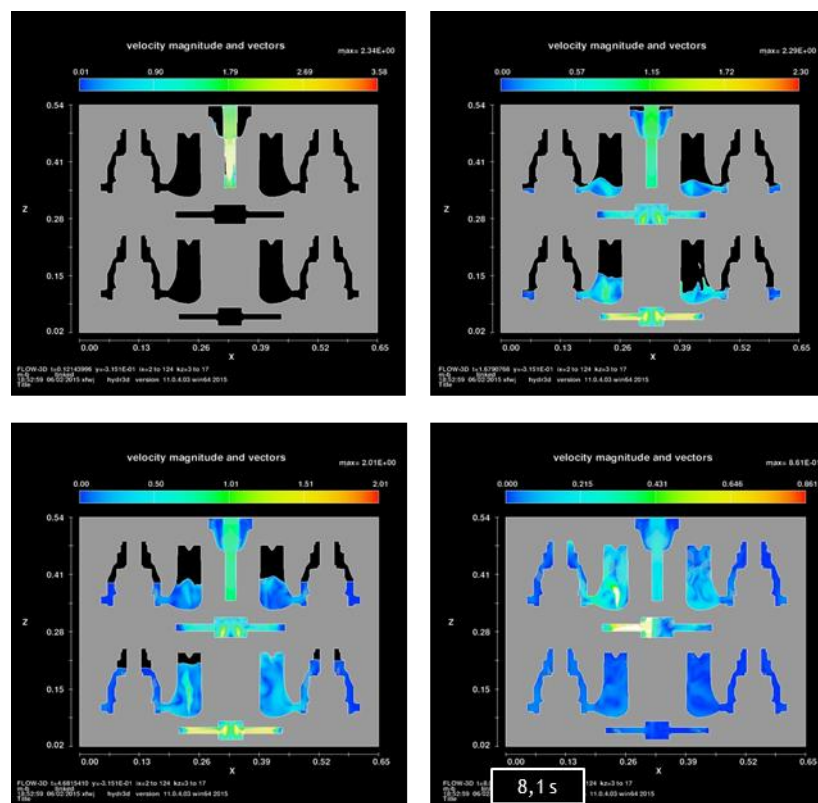


Figura 10f - Representação esquemática do enchimento da cavidade de moldação, em perspectiva 2D, da simulação 2.

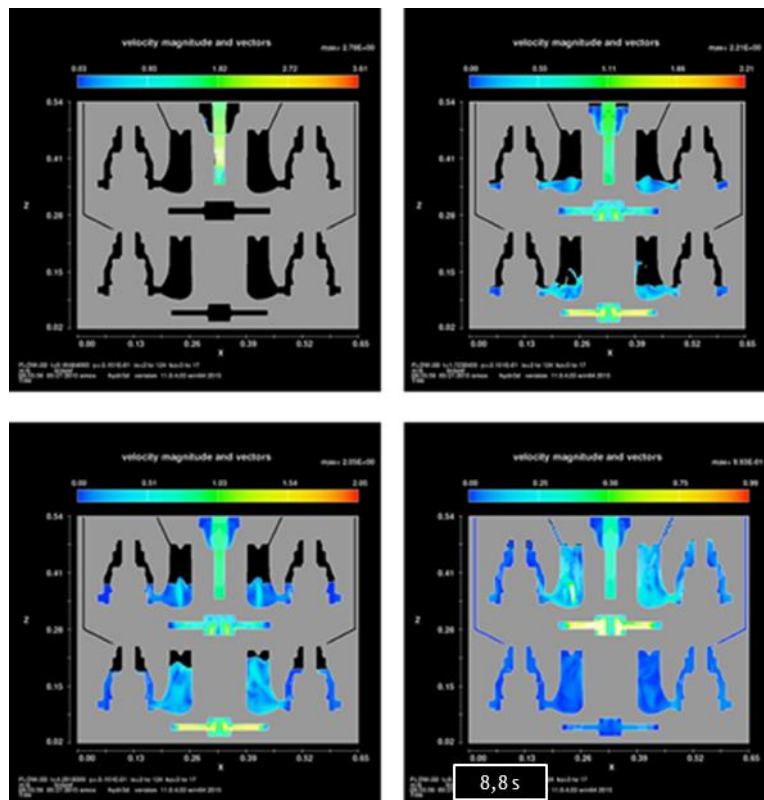


Figura 11f - Representação esquemática do enchimento da cavidade de moldação, em perspectiva 2D, da simulação 3.